NEUROCIENCIA
El poder del cerebro infantil

FILOSOFÍA DE LA FÍSICA
La teoría de cuerdas y los límites de la ciencia

SALUD
Función inmunitaria de los receptores gustativos

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA



Abril 2016 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de Scientific American

En busca del Planeta X

¿Se esconde un planeta gigante en los confines del sistema solar?





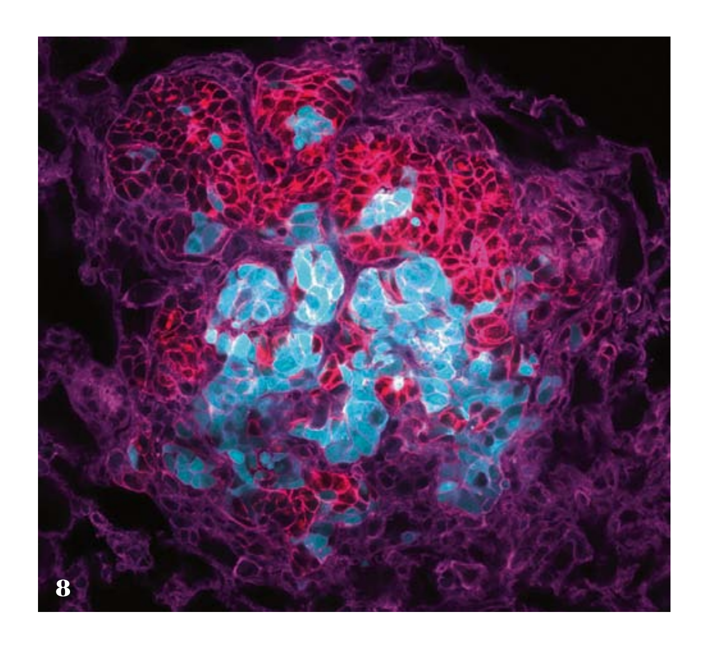
6,90 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
EN BUSCA DEL PLANETA X | EL PODER DEL CEREBRO INFANTIL | GARANTIZAR LA DEMOCRACIA EN LA ERA DIGITAL
N.º 475
ABRIL 2016



ARTÍCULOS

ALEX WILD


8


50


57

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



Las extrañas trayectorias de algunos de los cuerpos que orbitan más allá de Plutón han llevado a varios expertos a pensar que el sistema solar tal vez albergue una «supertierra»: un noveno planeta hasta diez veces más masivo que el nuestro. Dicho planeta se encontraría tan lejos del Sol que quedaría fuera del alcance de los telescopios actuales, pero podría aparecer en un futuro próximo. Ilustración de Ron Miller.

redaccion@investigacionyciencia.es



Noviembre 2015

A HOMBROS DE GIGANTES

En «La búsqueda de la teoría final», de Corey Powell [Investigación y Ciencia, noviembre de 2015], aparece una fotografía que muestra a varios teóricos de cuerdas de la Universidad Stanford; entre ellos, Leonard Susskind. Sobre la mesa pueden verse los tres volúmenes de las *Feynman lectures on physics* y una copia del libro *Gravitation*, de Charles W. Misner, Kip S. Thorne y John Archibald Wheeler.

Las *Feynman lectures on physics* son una introducción elemental a los cursos de física de la universidad. No puedo imaginar que un investigador tenga la necesidad de consultarlo a esas alturas de su carrera, por lo que entiendo que su inclusión fue debida a un deseo de homenajear al gran científico. También he echado un vistazo a *Gravitation*; aunque mucho más avanzado, sospecho que su presencia también responde a un homenaje.

Ronald Levine
Berkeley, California

Responde Susskind: *El fotógrafo sugirió colocar en un lugar visible algunos de los libros que más uso. Los libros de Feynman tal vez fuesen concebidos para estudiantes, pero contienen ideas extremadamente sutiles. Si uno se siente confuso sobre algún tema de física, el primer lugar al que acudir son las* Lectures *de Feynman. Si el tema es la gravedad, el segundo es el texto de Misner, Thorne y Wheeler.*

MAMOGRAFÍAS Y SOBREDIAGNÓSTICO

Creo que el artículo «Los riesgos de las mamografías», de Alexandra Barratt [Investgación y Ciencia, febrero de 2016], olvida el paso intermedio entre la mamografía y el tratamiento: la biopsia. Esta prueba es la que realmente determinará de qué tipo de tumor se trata (agresivo o no, grado de agresividad y extensión), si necesitará tratamiento y, en caso afirmativo, si precisará tumorectomía o mastectomía, entre otras posibilidades, así como el tipo de quimioterapia.

Cada una de nosotras es muy libre de someterse a las pruebas o tratamientos aconsejados por sus médicos o por las autoridades sanitarias. Pero, dado que todo lo impreso magnifica las opiniones, me parece imprescindible esta aclaración.

Concepción Alonso
Tenerife

Responde Barratt: *La excelente observación de la lectora se encuentra en el núcleo del problema del sobrediagnóstico en los cribados de cáncer de mama. Cuando un patólogo examina la biopsia de un cáncer sobrediagnosticado, lo clasifica como un cáncer; es decir, como un tumor maligno. Y dichos análisis son correctos: se trata de diagnósticos acertados desde el punto de vista patológico, no de falsos positivos. Estos últimos corresponden a anormalidades detectadas en las mamografías que, sin embargo, acaban revelándose como no cancerosas una vez que se llevan a cabo otras pruebas.*

Vistos al microscopio, los cánceres sobrediagnosticados presentan el mismo aspecto que los demás cánceres. La diferencia entre unos y otros radica en cómo se comportan cuando no se tratan. Un cáncer sobrediagnosticado puede no crecer y no propagarse. Y, si crece, lo hace lentamente, pudiendo llegar incluso a desaparecer con el tiempo.

Los informes patológicos pueden aportar algunas pistas sobre el comportamiento probable de un tumor (qué posibilidades tiene de extenderse o de reaparecer), pero no pueden predecir con seguridad qué cánceres crecerán hasta poner en riesgo la vida de la paciente. Por ello, en el momento de conocer los resultados de la patología, es imposible decir si una mujer en concreto ha sido sobrediagnosticada o no. Esto supone una gran incertidumbre para los médicos y para las pacientes, por lo que, por seguridad, a todas ellas se las somete a cirugía y a tratamientos adyuvantes (radioterapia y terapia endocrina), si bien algunas no los necesitarán nunca. De este modo, el sobrediagnóstico de cáncer de mama convierte involuntariamente a algunas mujeres en pacientes de cáncer de manera innecesaria.

Hoy en día, la búsqueda de métodos para prevenir el sobrediagnóstico constituye una investigación de vanguardia en medicina. Su objetivo consiste en reducir el riesgo de daño iatrogénico en la asistencia médica moderna. España está desempeñando un papel pionero en este campo: en septiembre de 2016, Barcelona acogerá la 4.ª Conferencia Internacional para la Prevención del Sobrediagnóstico (www.preventingoverdiagnosis.net).



Febrero 2016

Erratum corrige

En **Ecuaciones elegantes**, de Clara Moskowitz [Investigación y Ciencia, marzo de 2016], hay un error en la lámina que reproduce la ley de Ampère (creada por el matemático de Stony Brook Simon Donaldson). El error aparece en el segundo término de la expresión para J_y. La forma correcta de dicha ecuación es:

$$J_y = \frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x}$$

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es
La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



LEONES en el Parque Nacional Serengueti. Se sostiene que forman la única gran población del este de África que no se halla en declive.



MICHAEL NICHOLS, GETTY IMAGES

CONSERVACIÓN

Leones en brete

Este gran felino está protagonizando un resurgimiento sorprendente, pero solo si permanece entre rejas. ¿Qué se necesita para obtener mayores réditos?

En verano de 2015, la muerte del león Cecil acaparó los noticiarios. La caza deportiva no es un asunto baladí, pero *Panthera leo* afronta problemas más graves que los cazadores pudientes armados con rifles de gran calibre. Catalogado como especie en peligro, el león está acosado por varias causas, entre ellas la regresión del hábitat, la disminución de presas, la represalia por haber matado (real o supuestamente) reses y personas, y la caza furtiva para elaborar remedios tradicionales. En África ha quedado relegado a solo el 17 por ciento de su antigua área de distribución, con una sola población vestigial fuera del continente, en India. Nuevas investigaciones revelan que, a pesar de este panorama funesto, está logrando prosperar en algunos lugares. Pero esos éxitos esperanzadores no son tan sencillos como pueda parecer a primera vista, y el porvenir venturoso del león africano no tendrá un coste módico.

Pese a lo bien estudiado que ha sido el rey de la selva, la mayoría de los estudios han versado en torno a poblaciones aisladas y no a la especie entera, que hoy se reduce a unos escasos 20.000 individuos. Tras reunir los datos, los expertos disponen ahora de una visión de conjunto de la situación del carnívoro emblemático de África. En el último estudio de este tipo, un grupo dirigido por Hans Bauer, zoólogo de la Universidad de Oxford, ha compilado los datos de estudios realizados en los últimos veinte años en 47 poblaciones de leones. Se ha comprobado así que, de las nueve poblaciones de África occidental, todas salvo una están en declive (y dos de ellas podrían haber desaparecido ya). En África oriental tampo-

co gozan de una situación mucho mejor; la población del Serengueti es el único gran grupo que muestra una tendencia positiva. Según el análisis más prudente, la población del oeste del continente tiene una probabilidad del 67 por ciento de quedar reducida a la mitad en veinte años, mientras que en el este esa probabilidad ronda el 37 por ciento.

Pero el estudio arrojó también una brizna de esperanza: la mayoría de los leones del sur de África están en auge y «tienen muchas posibilidades de perdurar», según el experto de la Universidad de Minnesota Craig Packer, que supervisó el estudio, recientemente publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. ¿Por qué? Porque habitan en desiertos tan remotos e inhóspitos que el ser humano no supone una amenaza, o bien viven en parques y reservas cercados.

Si el área cercada es vasta —el Parque Nacional Kruger de Sudáfrica, vallado en su mayor parte, tiene una extensión similar a la provincia de Badajoz—, los leones siguen cumpliendo su papel de superdepredador y regulan el ecosistema controlando las manadas de antílopes, búfalos y otros ungulados, lo que a su vez ayuda a conservar las comunidades vegetales. A pesar de los límites artificiales, Packer asegura que nadie duda de que Kruger es un auténtico ecosistema, donde se producen procesos ecológicos genuinos.

Pero la mayoría de las zonas cercadas son bastante más reducidas. «Si se encierra fauna en un terreno pequeño, hay que gestionarla intensamente, porque la dinámica de la población parece desmadrarse. Y no acabamos de entender por qué», advierte Lindsey. La «gestión intensa» puede consistir en la implantación de anticonceptivos hormonales en algunas hembras para evitar la superpoblación, o la captura y el traslado de individuos a otras reservas para enriquecer la diversidad genética. Si no afluye con periodicidad sangre nueva a las manadas pequeñas, estas corren el peligro de sufrir los efectos de la consanguineidad y quedar condenadas a la desaparición.

Las cercas aseguran la supervivencia de los leones y de otra fauna en zonas donde sería imposible mantener grandes mamíferos en plena libertad, pues evitan el conflicto con los humanos, con su ganado y con sus cultivos

Hasta las pequeñas reservas valladas tienen valor para la conservación, opina Peter A. Lindsey, investigador de la organización conservacionista Panthera y ajeno al estudio: «Todo terreno protegido cuenta para la conservación. Cuantos más, mejor». Las cercas aseguran la supervivencia de los leones y de otra fauna en zonas donde sería imposible mantener grandes mamíferos en plena libertad, pues evitan el conflicto con los humanos, con su ganado y con sus cultivos. En muchos lugares, las organizaciones conservacionistas pueden trabajar en la recuperación de la fauna únicamente porque han convencido a los lugareños de que las barreras garantizarán su seguridad.

Sin embargo, no todos los biólogos ven en las cercas la salvación de los leones. Bauer y sus colaboradores advirtieron en su estudio de que «la contribución de los leones confinados a la funcionalidad del ecosistema es limitada». ¿El vallado no convertirá un paraje en poco más que en un zoológico con pretensiones, y a los leones en una costosa atracción turística?

Ese tipo de intervenciones ayudan, pero no son la panacea. «Es preciso conciliar las necesidades de la especie con nuestras prioridades y las de las comunidades locales», afirma el investigador del Instituto de Zoología Andrew Jacobson. La valla no resultaría práctica, por ejemplo, en lugares donde impidiera las migraciones de la fauna, como la del ñu, que cada año atraviesa el Serengueti en busca de las lluvias.

Los especialistas disienten en la utilidad de las rejas, pero en lo que sí coinciden casi todos es que el porvenir del león en África depende más de los dólares que de los cercados. Numerosos parques y reservas del continente languidecen por la escasez crónica de fondos. Según un análisis realizado por Packer en 2013, es más barato mantener leones en reservas cercadas a razón de unos 500 dólares por kilómetro cuadrado (sin contabilizar el alto coste de la instalación) que en las zonas sin vallar, donde 2000 dólares solo llegan para mantener la población a la mitad de su densidad potencial. Pero un análisis de Scott Creel, de la Universidad de Montana, concluyó que, teniendo en cuenta el gasto que supone, invertir en las zonas sin vallar ayuda a un mayor número de leones.

Si los administradores de África contaran con tanta financiación como el Parque Nacional de Yellowstone, unos 4100 dólares por kilómetro cuadrado, podrían permitirse el lujo de acoger una población media de leones no cautivos de unos dos tercios de su dimensión potencial, mejor que la situación actual. A pesar de la utilidad del ecoturismo y de la caza deportiva para la conservación del león en general, el porcentaje de los ingresos que llega a manos de los gestores de fauna es escaso.

En aquellos lugares donde la ecología hace desaconsejable el vallado, la financiación resulta esencial para ofrecer incentivos que compensen a los pobladores por el coste de la coexistencia con los grandes carnívoros, como la pérdida de ganado a manos de los felinos hambrientos o dejar de pastar en terrenos protegidos. No hay que olvidar que, si el ganado de la población humana en auge sigue creciendo a expensas de las presas naturales, los leones no tendrán más remedio que atacar a los rebaños. Ello, a su vez, puede dar pie a más represalias, y el felino quedará entre la espada y la pared: será víctima del enfrentamiento directo con el hombre y de la escasez de alimento. Las vallas serán beneficiosas para algunos ecosistemas, mientras que en otros casos se deberá recurrir a proyectos de compensación que mitiguen el conflicto, pero, sea cual sea la solución, conllevará un elevado coste.

Así las cosas, los últimos avances ofrecen un camino a seguir: los leones aún tienen cabida en África por mucho tiempo en tanto la comunidad internacional esté dispuesta a sufragarlo. «Si se puede aumentar la financiación de las zonas protegidas, no hay ningún motivo para que las zonas protegidas no puedan acoger muchos más leones», concluye Lindsey.

—Jason G. Goldman



CIENCIA COTIDIANA

Micrometeoritos en la puerta de casa

Los fragmentos de material extraterrestre abundan más de lo que parece y no resultan difíciles de identificar

Aunque los grandes meteoritos son —por fortuna— muy escasos, los más pequeños bombardean la Tierra sin cesar. La NASA calcula que, cada día, caen sobre nuestro planeta más de cien toneladas de polvo, grava y piedras procedentes del espacio. «Si bajamos hasta el tamaño de una canica, podremos encontrar uno por kilómetro cuadrado de superficie terrestre», explica el astronauta civil y cazador de meteoritos Richard Garriott. «Y si bajamos al tamaño de un grano de arroz, es increíble lo corrientes que son.»

De hecho, puede que en el tejado de su casa haya unos cuantos micrometeoritos. La mayor parte de ellos cae al mar, pero algunos lo hacen sobre las ciudades, donde suelen acumularse en los rincones y los resquicios de los tejados. Cuando llueve, la lluvia los arrastra hacia los canalones.

Muchos meteoritos son ricos en níquel y hierro. Para encontrarlos, Garriott emplea un potente imán, el cual hace pasar sobre las hendiduras de las losetas situadas junto a la boca de un canalón. Por supuesto, no todo lo que acaba en el imán viene del espacio; también pueden aparecer restos de materiales de construcción o fragmentos de rocas terrestres. Sin embargo, no es muy difícil separar el trigo de la paja: los micrometeoritos son esféricos y tienen «costra», el característico recubrimiento de vidrio que se crea cuando un material se funde. La mejor forma de confirmar su presencia es a través del microscopio.

Garriott no es el único entusiasta que rastrea su porche en busca de tesoros celestes. Numerosos aficionados han remitido ya más de 3000 fotografías de posibles piedras espaciales a la iniciativa Project Stardust (www.facebook.com/micrometeorites), que anima a todos los científicos aficionados a compartir sus hallazgos.

—*Jennifer Hackett*

COMPORTAMIENTO ANIMAL

De ninfa huérfana a madre descuidada

Las tijeretas transmiten sus traumas a la descendencia

Una de las conmociones más profundas que puede sufrir un individuo es la pérdida de un progenitor a una edad temprana. Se sabe que muchas especies de mamíferos, entre ellas la humana, transmiten este trauma a las generaciones siguientes. Ahora, un grupo de biólogos ha demostrado que lo mismo ocurre con algunos insectos. Según un artículo publicado a finales del año pasado en *Proceedings of the Royal Society B*, las ninfas de tijereta común que han de apañárselas solas durante las primeras etapas de su vida se convierten luego en progenitoras más desapegadas.

Al contrario de lo que ocurre con la mayoría de los vertebrados, los juveniles de tijereta pueden sobrevivir sin asistencia materna. A la vista de ello, el biólogo evolutivo Joël Meunier, por entonces en la Universidad Johannes Gutenberg de Maguncia, y sus colaboradores se preguntaron cómo afectaría la falta de la madre a estos artrópodos. En su experimento, 40 madres de tijereta criaron a un total de 1600 ninfas; otras 1600, en cambio, tuvieron que arreglárselas solas. Un tiempo después, los investigadores observaron que las ninfas hembra del primer grupo se habían convertido en devotas madres: limpiaban los huevos con frecuencia, alimentaban a sus crías y las defendían. En cambio, las hembras de tijereta que habían crecido sin compañía materna no destacaron como cuidadoras. No alimentaban a sus descendientes tan a menudo ni los protegían tan eficazmente de los depredadores.

El trauma parece tener un componente genético. Los investigadores observaron que los juveniles de madres huérfanas, incluso cuando eran criados por progenitores adoptivos, recibían menos atenciones que los especímenes de control. Estos resultados sugieren que alguno de los aspectos que intervienen en una crianza deficiente podría ser hereditario.

Meunier, ahora en la Universidad de Tours, explica que estudiar la crianza en insectos tal vez arroje luz sobre los orígenes de la dinámica familiar y del comportamiento social. «No hay muchas especies de artrópodos en las que los progenitores cuiden a su descendencia, pero las que lo hacen podrían ayudarnos a saber cómo y por qué evolucionó la vida en familia», concluye el investigador.

—*Rachel Nuwer*



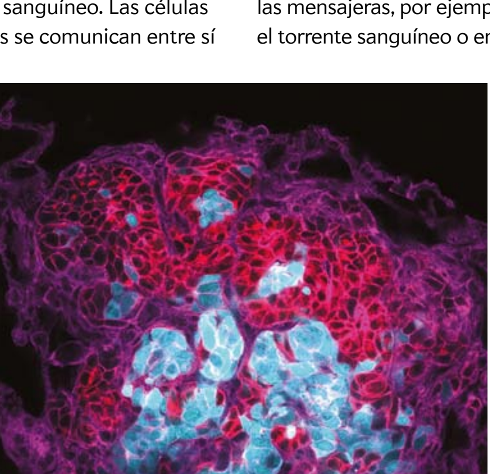
THOMAS FUCHS (*micrometeoritos*); TIM SHEPHERD, GETTY IMAGES (*tijeretas*)

BIOLOGÍA

Cómplices tumorales

Las células cancerosas que viajan en grupo son las responsables de la diseminación de la enfermedad

La metástasis es la culpable de la inmensa mayoría de las muertes por cáncer: cuando las células se desprenden del tumor y se hacen fuertes en otros lugares, el tratamiento se complica. Un nuevo estudio muestra que, en contra de lo esperado, la mayoría de los tumores metastásicos no tiene su origen en células solitarias procedentes del tumor primario, sino en conglomerados de células que se desprenden de él y viajan juntas por el torrente sanguíneo. Las células que integran esos conglomerados itinerantes se comunican entre sí y fabrican proteínas específicas que podrían servir como dianas farmacológicas o bioindicadores del riesgo de metástasis. Para averiguar cómo se forman las metástasis, Andrew Ewald, biólogo celular especializado en cáncer, y su equipo de la Universidad Johns Hopkins crearon tumores en ratones inyectando una mezcla de células cancerosas multicolores en su torrente sanguíneo. Si los tumores surgieran de una sola célula, al microscopio lucirían un color uniforme. Si, en cambio, nacieran de agrupaciones de células, crecerían en esferas multicolores. El equipo comprobó que cerca del 95 por ciento de los tumores malignos formados eran multicolores y, por tanto, engendrados por varias células (*metástasis pulmonar, ilustración*).



CORTESÍA DE BREANNA MOORE, CHEUNG LABORATORY, FRED HUTCHINSON CANCER RESEARCH CENTER

En un segundo experimento, examinaron cientos de células tumorales cultivadas juntas en una placa de Petri pero sin contacto físico entre ellas. Casi todas murieron. Por el contrario, las células de otra placa que pudieron agregarse se multiplicaron en más colonias, aunque el número inicial de «semillas» era menor. «Si se controla el número de células, la eficiencia de la formación de metástasis a partir de células agregadas se multiplica por más de cien», explica Ewald. Los resultados se publicaron el pasado febrero en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*.

No está claro por qué las células agregadas sobreviven y metastatizan más, pero es probable que la cooperación entre las integrantes de los conglomerados (mediante el intercambio de moléculas mensajeras, por ejemplo) las proteja contra la muerte celular en el torrente sanguíneo o en los puntos distantes donde van a parar, apunta Joan Brugge, bióloga celular especializada en cáncer de la Escuela de Medicina de Harvard que no ha participado en el estudio.

En cuanto a las posibles ventajas para los pacientes, el equipo de Ewald también descubrió que los conglomerados viajeros comparten rasgos moleculares y casi todos sintetizan la proteína queratina 14. «El descubrimiento tal vez resulte útil para elaborar estrategias dirigidas contra todas las células metastásicas», explica. La meta sería destruir esas células dondequiera que se hallen, proliferen o no, una estrategia distinta de la mayor parte de los tratamientos ordinarios, que atacan a las células que se están multiplicando con rapidez, pero no las que circulan e inician los tumores secundarios. —*Viviane Callier*

NUTRICIÓN

Hamburguesas a base de setas

Restaurantes y escuelas de EE.UU. incorporan a los platos de ternera un ingrediente más saludable, las setas

Uno de los mayores experimentos científicos del año en las escuelas de Estados Unidos no tiene lugar en una probeta, sino en una hamburguesa. En lugar de las hamburguesas tradicionales, estudiantes de más de 300 distritos escolares de todo el país están comiendo *The Blend* [«La Mezcla»], una amalgama de hongos y carne.

Esta mezcla tiene su origen en una iniciativa del Instituto Culinario de EE.UU., que en 2011 formó equipo con la organización de productores de setas Mushroom Council para estudiar de qué modo los hongos comestibles pueden expiar los pecados nutricionales de la carne de ternera. Ambas entidades se asociaron con Jean-Xavier Guinard, científico de la Universidad de California en Davis, que dirige un laboratorio del sabor especializado en el análisis y caracterización del gusto de los alimentos. La novedosa hamburguesa vio la luz en 2014.

¿Por qué las setas como sustitutivo de la ternera? Porque contienen un cóctel químico que da un sabor cárnico, llamado umami, «sabroso» en japonés. Pero, a diferencia de la carne de vacuno, contienen menos calorías, menos sodio y menos grasas saturadas. Esas bondades nutricionales han convencido de probar la mezcla a las escuelas que quieren cumplir las recomendaciones nacionales de salud. Así, el pasado otoño, el proveedor de menús escolares Sodexo reemplazó las hamburguesas de siempre con versiones que contenían un 30 por ciento de setas (porcentaje equivalente a una ración de verdura). Si Sodexo acaba sirviendo este año el mismo número de hamburguesas que de costumbre, calcula que los colegiales consumirán unos 16 millones de gramos menos de grasas saturadas y 300 millones de miligramos menos de sodio.

Las setas también suponen una alternativa ecológica a las carnes rojas. Los proveedores han de cuantificar aún

SALUD

Beneficios de la asincronía del corazón

Los marcapasos que alteran temporalmente el ritmo cardíaco podrían reforzar el vigor de este órgano

A veces vale la pena desentonar. Un nuevo estudio demuestra que la alteración deliberada de la sincronización de las contracciones cardíacas ayudaría a tratar la insuficiencia cardíaca, la incapacidad para bombear sangre suficiente.

En una cuarta parte de los cinco millones de personas que solo en Estados Unidos padecen insuficiencia cardíaca, las cavidades del corazón no se contraen en perfecta sincronía. Cuando se implanta un marcapasos para restaurar la sincronización, lo que se conoce como tratamiento de resincronización cardíaca, el corazón suele volverse más fuerte que el de los pacientes con insuficiencia cardíaca que nunca han sufrido contracciones desacompasadas. En otras palabras, pasar de la asincronía a la sincronía parece ser beneficioso. Esa observación llevó a David Kass, director del Centro Johns Hopkins de Cardiobiología Molecular, a una pregunta incitante: ¿sería beneficioso para los pacientes aquejados de insuficiencia cardíaca un poco de discordancia?

Para responder a la pregunta, Kass y sus colaboradores implantaron marcapasos a 23 perros y a 17 se les provocó una insuficiencia cardíaca. Después, durante seis horas al día, el marcapasos de 8 de ellos obligaba al lado derecho del ventrículo a contraerse antes que el izquierdo. El resto del día, el aparato retomaba la estimulación sincronizada.

Al cabo de cuatro semanas, los perros portadores de los marcapasos programados con el período de contracción irregular evidenciaron una notable mejora de los principales indicadores de la salud cardíaca. El corazón bombeaba con más fuerza, y las proteínas responsables de las contracciones y de la estructura muscular eran más numerosas. Los resultados, publicados el pasado diciembre en *Science Translational Medicine*, ponen en entredicho todas las ideas imperantes sobre el tratamiento de resincronización cardíaca, asegura George Thomas, cardiólogo del Hospital Presbiteriano de Nueva York y de la Universidad Cornell, que no ha participado en el estudio.

LOS PERROS portadores de los marcapasos programados con el período de contracción irregular evidenciaron una notable mejora de los principales indicadores de la salud cardíaca.

HENRY STEADMAN, GETTY IMAGES (*corazón*); THOMAS FUCHS (*hamburguesa*)

El tratamiento puede compararse con la reacción del cuerpo a la vacunación. Igual que la inyección de un virus debilitado o de partes del mismo desencadena una respuesta inmunitaria protectora, la exposición del corazón a una «dosis» de asincronía fortalece su funcionamiento. Kass planea estudiar la estrategia en humanos más o menos en el plazo de un año, pero otros cardiólogos ya han tomado nota de los resultados preliminares. «Es una idea muy sugerente y original», confiesa David Frankel, que trata la insuficiencia cardíaca en la Universidad de Pensilvania. Frankel piensa en el enorme número de pacientes que podrían beneficiarse de esa interrupción de la monotonía.

—Jessica Wapner

el impacto ambiental, pero Kirk Broders, profesor adjunto de agricultura ecológica de la Universidad de Colorado, lo vislumbra positivo. «Sería mucho más sostenible que la cría de ganado», destaca. La fungicultura consume menos recursos: las variedades comerciales crecen en estiércol y en subproductos agrícolas ricos en carbono, como la farfolla de maíz. Tampoco necesitan el espacio de los animales de granja, ni antibióticos. Y alcanzan la madurez mucho más rápido.

A pesar de los éxitos cosechados, la nueva hamburguesa no funciona en todos los casos. En una reciente degustación a ciegas, 147 comensales comieron carne asada y relleno para tacos elaborados con distintas proporciones de ternera y setas. Si bien más de la mitad prefirió los tacos que contenían setas a los de solo carne, muchos puntuaron bajo el sucedáneo de carne asada por su textura y aspecto. «Cuando comes la carne asada, esperas encontrar hebras de carne», explica Guinard. «El relleno de taco se pica fino, así que no la notas.»

Si las hamburguesas triunfan en las escuelas, pronto podrían aparecer en las cafeterías de las empresas. Algunas cadenas estadounidenses de restauración, como Pizza Hut y Seasons 52, han incorporado con discreción a sus menús primeros platos con la mezcla, en una apuesta por propuestas más saludables. Tal vez *The Blend* se convierta en la hamburguesa del futuro. Por lo menos hasta que las hamburguesas de laboratorio no sean una realidad.

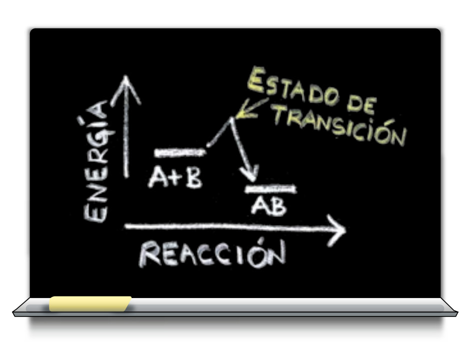
—Natalie Jacewicz

QUÍMICA

Ni aquí ni allí

Logran medir por primera vez las propiedades de una molécula en el huidizo momento en que experimenta una transición química

Si vamos de un valle a otro a través de un puerto de montaña, alcanzaremos antes o después el punto más alto, donde seguramente haremos una parada para disfrutar del paisaje antes de iniciar el descenso. Esta analogía sirve para ilustrar uno de los misterios de la química: qué sucede en el breve estado de transición que se produce cuando una molécula se transforma en otra especie química.



Hasta ahora se pensaba que los estados de transición serían demasiado inestables y pasajeros para poder observarlos. Sin embargo, un trabajo reciente ha conseguido medir la energía y las propiedades del estado intermedio que adopta una molécula cuando cambia su conformación. Al igual que la altura del puerto de montaña condicionará cuánto tardaremos en alcanzar la cumbre, las propiedades energéticas de un estado de transición determinan cuánto tardan los reactivos químicos en adoptar una nueva configuración.

Para efectuar las mediciones, Joshua Baraban, por entonces estudiante de doctorado en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, y sus colaboradores excitaron acetileno con un láser. En esta reacción simple, la molécula se tuerce: de una conformación lineal pasa a una en zigzag. El acetileno vibró de modo predecible a medida que absorbía luz cada vez más intensa, pero, justo antes que se produjese el cambio de la configuración lineal a la zigzagueante, las vibraciones se detuvieron. Gracias a ello, los investigadores lograron caracterizar el esquivo estado de transición.

«Vimos que la frecuencia de las vibraciones caía en picado a cero justo en el momento en que la molécula se hallaba sobre la "joroba" que separa una conformación de otra», explica Baraban, ahora en la Universidad de Colorado en Boulder. Al medir la energía necesaria para llegar al punto en que las vibraciones se detenían, los investigadores pudieron estudiar las propiedades energéticas del estado de transición. Los resultados aparecieron publicados el pasado mes de diciembre en la revista *Science*.

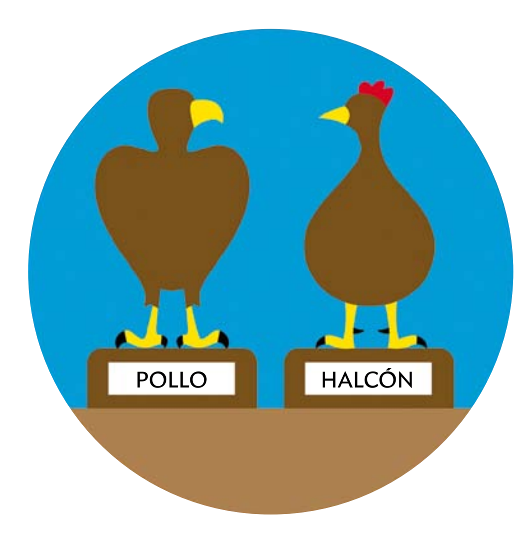
El método también permitió seguirle los pasos al estado de transición de una conversión más compleja: la del cianuro de hidrógeno en isocianuro de hidrógeno, como comprobó Georg Mellau, de la Universidad de Giessen. Según Baraban, la capacidad para analizar ese breve instante «será importante allí donde lo sea la química». Por ejemplo, un mejor conocimiento de los estados de transición en las reacciones de combustión permitiría concebir automóviles más eficientes.

—Charles Schmidt

TAXONOMÍA

El rompecabezas de la clasificación

Muchas fichas de los especímenes conservados en los museos lucen nombres impropios



Se la llame como se la llame, una rosa siempre huele bien; pero, fragancia aparte, su nombre científico es *Rosa gallica*, y así debería denominarse en las colecciones botánicas. Pero más de la mitad de los especímenes vegetales conservados en los herbarios podrían estar etiquetados incorrectamente, y el problema podría afectar a otro tipo de colecciones, según un estudio publicado en *Current Biology*.

Para averiguar cuán generalizado se halla el problema del etiquetaje incorrecto, investigadores de la Universidad de Oxford y del Real Jardín Botánico de Edimburgo analizaron las etiquetas de 4500 especímenes de malagueta y afines (*Aframomum*) y más de 49.000 especímenes de campanillas (*Ipomoea*) como casos de estudio. «Hemos descubierto que al menos la mitad de los nombres de esos especímenes son sinónimos o impropios», explica el botánico Robert Scotland.

Los errores de nomenclatura surgen probablemente cuando los biólogos y los conservadores de las colecciones clasifican muestras de una especie sin consultarlo antes con colegas de otras instituciones. En otros casos, la muestra aparece designada únicamente por su género si de buen principio el nombre de la especie no se consignó o se ignoraba, una simplificación que el equipo de Scotland consideró incorrecta. Y aunque creen que el problema es más grave en las colecciones botánicas que en las de animales vertebrados, sospechan que los equívocos abundan también en los armarios de cajas entomológicas.

Algunos expertos, entre ellos Barbara Thiers, directora del Herbario Steere del Jardín Botánico de Nueva York, cree que el cálculo de la mitad de las plantas es exagerado. Pero tanto Thiers como Scotland coinciden en que la escasez de fondos para la gestión de las colecciones convierte en una tarea titánica la clasificación precisa de los miles y miles de especímenes. Los esfuerzos colectivos, como las bases de datos virtuales The Plant List, FishNet y ZooBank, pueden ayudar a resolver el problema.

Pero ¿tiene sentido todo ese alboroto? Los nombres erróneos pueden interferir con el estudio de un ser vivo y entorpecer los esfuerzos de conservación. «Si no sabemos el nombre correcto de una planta o de un animal, no hay manera de salvarlo», asegura Thiers.

—Jennifer Hackett

JEN CHRISTIANSEN (*pizarra*); THOMAS FUCHS (*aves*)

ESPACIO

Los primeros pasajeros del mayor cohete de la NASA

Trece pequeños satélites inaugurarán el Sistema de Lanzamiento Espacial

El cohete más potente de la historia, el Sistema de Lanzamiento Espacial (SLS, por sus siglas en inglés), despegará en 2018. Aunque esta nave de la NASA tiene como objetivo último llevar seres humanos al espacio [*véase* «Un cohete para llegar a Marte», por David H. Freedman; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2015], en su primer vuelo de prueba transportará 13 CubeSats: pequeños satélites del tamaño de una caja de zapatos. Hace poco, la NASA anunció cuáles serán algunas de estas misiones. Sus objetivos abarcan desde el estudio de asteroides hasta la búsqueda de agua en la Luna. He aquí una muestra:



ESTUDIO DE ASTEROIDES CERCANOS

El satélite NEA Scout tomará datos sobre la rotación, la topografía y la composición de la superficie del asteroide 1991 VG, un objeto cercano a la Tierra que podría convertirse en el lugar de aterrizaje de una futura nave espacial.
Proyecto del Centro de Vuelos Espaciales Marshall y del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA

EFECTOS DE LA RADIACIÓN CÓSMICA SOBRE LOS ORGANISMOS

El CubeSat Biosentinel transportará, por primera vez desde 1972, organismos vivos más allá de una órbita terrestre baja. En este caso se tratará de levaduras. Durante los 18 meses que durará la misión, numerosos sensores estudiarán el tipo y la intensidad de las radiaciones con que se encontrarán las levaduras y cómo estas se verán afectadas. La exposición a la radiación es uno de los principales riesgos que deberán afrontar las misiones tripuladas que se dirijan a destinos más lejanos, como Marte.
Proyecto del Centro de Investigaciones Ames de la NASA

ESTUDIO DE PARTÍCULAS SOLARES

Provisto de un magnetómetro, un espectrógrafo de iones y un telescopio de protones en miniatura, el satélite CUSP estudiará varios fenómenos en tiempo real; entre ellos, la radiación y el viento solar que incidan sobre él. Con ello los expertos intentarán entender cómo se forman las tormentas geomagnéticas y de qué modo afectan a la Tierra.
Proyecto del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA y del Instituto de Investigación del Sudoeste

BÚSQUEDA DE AGUA EN LA LUNA

En su órbita alrededor de nuestro satélite natural, Lunar IceCube efectuará el rastreo más completo hasta la fecha para buscar agua en la Luna. En el pasado, otras sondas han encontrado trazas de la molécula, pero Lunar IceCube ha sido optimizado para detectar agua en todas sus formas. La posibilidad de acceder a recursos en el espacio se considera un aspecto clave para las misiones tripuladas de larga duración.
Proyecto de la Universidad estatal de Morehead

GANADORES DEL CONCURSO CUBE QUEST CHALLENGE

En 2017 se seleccionarán tres misiones entre las presentadas por estadounidenses que no pertenezcan a la NASA o por otras agencias gubernamentales. Habrá premios para aquellos equipos que consigan entrar en órbita lunar, que más se adentren en el espacio o que mantengan la comunicación con la Tierra durante más tiempo.

—Jennifer Hackett

CORTESÍA DEL CENTRO DE VUELOS ESPACIALES MARSHALL DE LA NASA (*SLS, recreación artística*); MUSEO DE CIENCIAS NATURALES (*canapé*)

AGENDA

CONFERENCIAS

7, 14, 21 y 28 de abril – Ciclo
Los avances de la química y su impacto en la sociedad (5.ª edición)
Centro de Química Orgánica Lora-Tamayo (CSIC)
Madrid
http://www.losavancesdelaquimica.com

EXPOSICIONES

Big Neurona
Museo Nacional de Ciencia y Tecnología
La Coruña
www.muncyt.es > coruña > exposiciones

Nutrición, impulso vital
Museo de Ciencias Naturales
Barcelona
museuciencies.cat > exposiciones



OTROS

3, 8, 17 y 24 de abril – Jornadas
Mes del Aire para Niños y Jóvenes
Sociedad Aeronáutica Española
Madrid
www.sociedadaeronautica.org

6 y 13 de abril – Curso
El proyecto LIFE LimnoPirineus en el aula
Actividad para profesores
Centro de Estudios Avanzados de Blanes (CSIC)
www.dicat.csic.es > csic en el aula

Hasta el 17 de abril – Concurso
Ciencia Clip
Concurso de vídeos de ciencia diseñados y producidos por estudiantes de Secundaria
Cátedra de Cultura Científica de la Universidad del País Vasco
cienciaclip.naukas.com

21 de abril – Charla
Energía y sostenibilidad: ¿Cómo se moverán los coches del futuro?
M.ª Olga Guerrero Pérez, Universidad de Málaga
Cervecería Molly Mallone's
Málaga
uciencia.uma.es > Beer for Science

FÍSICA DE PARTÍCULAS

El extraño comportamiento del quark *cima*

¿Esconde algo la partícula más pesada?

JUAN ANTONIO AGUILAR SAAVEDRA

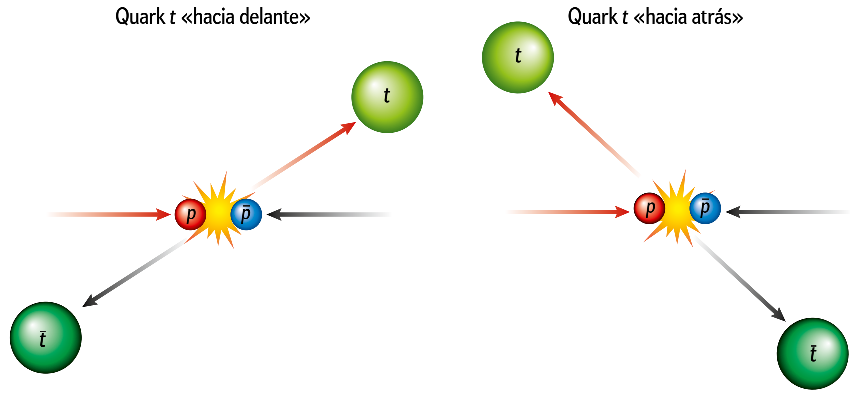
Los experimentos de física de partículas exploran energías cada vez más elevadas con la esperanza de hallar indicios que permitan, como objetivo último, formular una teoría que unifique todas las interacciones fundamentales de la naturaleza, incluida la gravedad. Siendo menos ambiciosos, hay fundadas esperanzas de que los experimentos que actualmente lleva a cabo el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, cerca de Ginebra, arrojen luz sobre uno de los grandes enigmas de la física de partículas: por qué la masa del bosón de Higgs es casi un trillón de veces menor de lo que cabría esperar. Desde 2012, año de su descubrimiento en el LHC, sabemos que la masa de esta partícula asciende a unos 125 gigaelectronvoltios (GeV); sin embargo, hay argumentos teóricos que nos hacen pensar que su masa «natural» debería ser del orden de 10^{19} GeV. Esta y otras cuestiones abiertas, como la composición de la materia oscura, nos llevan a pensar en la existencia de nuevas partículas elementales y fenómenos físicos aún por descubrir.

En ese viaje hacia lo desconocido se siguen algunas pistas fiables. Una de ellas procede de la partícula elemental más masiva que se conoce: el quark t (*top*, o *cima*). Con una masa de unos 173 GeV, esta partícula pesa casi tanto como un átomo de oro. La intensidad con que una partícula elemental interacciona con el bosón de Higgs resulta proporcional a su masa, por lo que el quark t se acopla muy fuertemente al bosón de Higgs. Esta propiedad lo convierte en un objeto de estudio ideal para buscar indicios de nuevos fenómenos físicos.

El quark t fue descubierto en 1995 en el Tevatrón, un gran acelerador ya fuera de servicio que operaba en el laboratorio Fermilab, cerca de Chicago. Desde entonces, tanto el Tevatrón como el LHC han producido millones de pares formados por el quark t y su antipartícula, $\bar{t}$. Gracias a ello, hemos podido efectuar una gran cantidad de mediciones muy precisas sobre la manera en que estas partículas se producen y se desintegran. La esperanza implícita en tales experimentos radica en encontrar algún efecto inesperado, una «anomalía», que nos ponga tras la pista de una teoría más completa que el modelo estándar, el marco con el que hoy por hoy describimos todas las partículas elementales conocidas y sus interacciones.

En enero de 2011, la colaboración CDF, responsable de uno de los dos grandes detectores que operaban en el Tevatrón, anunció un resultado inesperado en la producción de pares $t\bar{t}$: una anomalía relacionada con la dirección en que ambas partículas salían despedidas una vez creadas. Desde entonces, los físicos hemos estado intentando entender si dicha discrepancia constituye o no una señal de nueva física. El estudio del problema ha dado lugar a grandes avances en el estudio del quark t y, en estos momentos, está guiando buena parte de los análisis que se llevan a cabo en el LHC.

El año pasado, el autor de este artículo y otros investigadores publicamos en *Reviews of Modern Physics* un artículo de revisión sobre las anomalías observadas en la producción de pares $t\bar{t}$ y sus perspectivas futuras. A continuación ofrecemos algunas claves para entender este intrigante fenómeno.



¿PRODUCCIÓN ANÓMALA? En el antiguo acelerador Tevatrón, cerca de Chicago, se hacían colisionar protones (p, *rojo*) contra antiprotones ($\bar{p}$, *azul*); como resultado, en algunos de esos choques se producían pares formados por el quark t y su antipartícula, $\bar{t}$ (*verde*). En 2011 se observó una proporción anómala entre el número de quarks que salían despedidos en el sentido del protón incidente (*izquierda*) y los que abandonaban el lugar de la colisión en sentido contrario (*derecha*). Hasta hoy, los expertos ignoran si dicha discrepancia constituye un efecto físico novedoso o si, por el contrario, se trata de una mera fluctuación estadística.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN EL AUTOR

La anomalía

En el Tevatrón se hacían colisionar protones contra antiprotones. Como resultado, en algunos de esos choques se producían pares $t\bar{t}$. La anomalía observada consistía en una asimetría inesperada entre el número de quarks t que salían despedidos en el sentido del protón incidente y el número de quarks t que abandonaban el lugar de la colisión en sentido opuesto (*véase la figura adjunta*). La diferencia relativa entre el número de quarks t emitidos «hacia delante» y el número de quarks t emitidos «hacia atrás» se denota A_{FB} (del inglés *forward-backward asymmetry*). El modelo estándar predice que dicha cantidad debería tomar un valor positivo pero pequeño. En 2011, sin embargo, el experimento CDF midió un valor mayor del esperado.

No obstante, todo resultado en física de partículas es de naturaleza estadística. Y las leyes de la estadística nos dicen que, en cualquier experimento, deben producirse necesariamente desviaciones ocasionales con respecto a las predicciones. Así pues, ¿cómo saber si un resultado anómalo apunta a un fallo de la teoría vigente o, por el contrario, se trata de un mero efecto estadístico? Por convenio, un descubrimiento en física de partículas se define como una discrepan-

cia de 5 desviaciones estándar entre el valor medido y el predicho por la teoría. En el caso que nos ocupa, el desacuerdo observado por CDF ascendía a 3,4 desviaciones estándar. Sin duda interesante, pero aún insuficiente para certificar un efecto novedoso.

La expectación creció cuando la misma anomalía fue parcialmente confirmada por el experimento D0, el otro gran detector que operaba en el Tevatrón, así como por otras medidas relacionadas. ¿Nos hallábamos ante la primera grieta del modelo estándar?

La esperanza

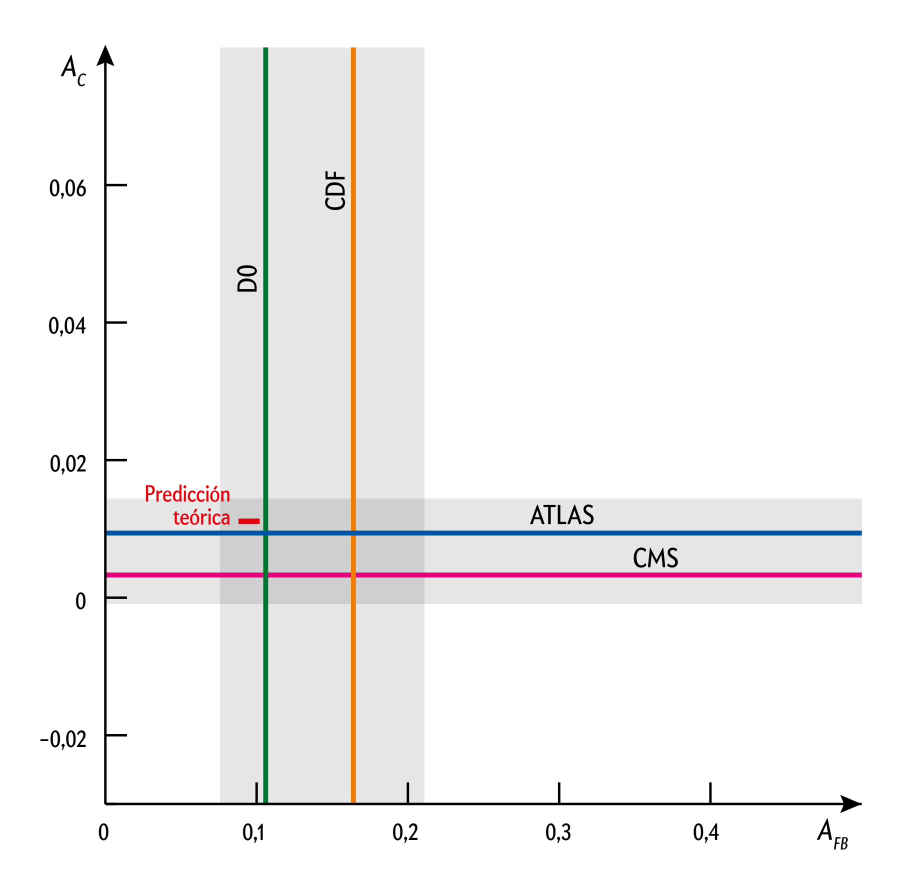
Mientras ambos experimentos continuaban tomando datos, se adelantaron numerosas propuestas que defendían que dicha desviación constituía la manifestación indirecta de la existencia de nuevas partículas, como versiones más masivas de los bosones Z y W (los mediadores de la interacción débil) o de los gluones (los responsables de transmitir la interacción fuerte). De igual modo, la discrepancia también podía explicarse si se suponía la existencia de más bosones de Higgs o incluso de otras partículas carentes de análogo entre las conocidas. Todos estos modelos «simples», no demasiado elaborados, permitían explicar la anomalía en A_{FB} y también otros resultados, como la probabilidad de producción de pares $t\bar{t}$ en colisiones protón-antiprotón.

De modo paralelo —y esta es, a posteriori, la consecuencia más interesante— se produjo un gran desarrollo en la física del quark t. Se propusieron nuevas medidas que contribuyeron a «diseccionar» sus propiedades a fin de contrastar las predicciones de los modelos mencionados con la realidad experimental. En general, la batería de tests relativos al quark t (y al bosón W, uno de sus productos de desintegración) se ha visto considerablemente ampliada desde entonces. Se han introducido nuevos métodos para medir su polarización, las correlaciones entre los espines de la pareja $t\bar{t}$, etcétera.

Parte de las nuevas medidas propuestas se han ido efectuando tanto en el Tevatrón como en el LHC. En todos los casos, sin embargo, el dictamen ha sido prácticamente unánime: el quark t se comporta como se esperaba de él.

El desencanto

Ese jarro de agua fría se vio acompañado más tarde de los resultados definitivos de



DATOS Y PREDICCIONES: El acelerador Tevatrón midió la diferencia relativa en el número de quarks t que salían despedidos en una dirección y otra (A_{FB}). En los últimos años, el LHC del CERN ha medido la «asimetría de carga» (A_C), una cantidad física relacionada con la anterior. Esta gráfica muestra los valores finales obtenidos por los detectores CDF y D0, del Tevatrón, y los hallados hasta el momento por ATLAS y CMS, del LHC, con sus respectivos intervalos de error (*gris*). A pesar del gran número de datos analizados, los resultados no parecen coincidir todo lo bien que cabría esperar con las predicciones del modelo estándar (*rojo*).

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN EL AUTOR

los experimentos CDF y D0. Aunque ambos dejaron de tomar datos en septiembre de 2011, tras la parada definitiva del Tevatrón, los análisis finales se presentaron en 2014. Si bien el valor final de A_{FB} obtenido por CDF discrepa en unas 2 desviaciones estándar del predicho por el modelo estándar, el obtenido por D0 presenta un acuerdo mayor.

Más aún, entre las nuevas medidas propuestas para explorar la anomalía, hay una que destaca por su importancia: la llamada «asimetría de carga», A_C, en la producción de pares $t\bar{t}$. Dicha cantidad ha sido medida en el LHC y se encuentra relacionada con la distribución angular de los quarks producidos en la colisión. Dado que en el LHC se hacen colisionar protones contra protones (y no protones contra antiprotones, como en el Tevatrón), no hay ninguna dirección a la que podamos llamar «adelante» o «atrás». Por ello se mide en su lugar la cantidad A_C, que en los modelos más simples se halla estrechamente vinculada con A_{FB}. En general, los dos grandes detectores del LHC, ATLAS y CMS, han obtenido —con excepción del último valor medido por el experimento CMS— resultados bastante próximos a las predicciones del modelo estándar.

El rompecabezas

La primera pregunta es si tales desviaciones podrían deberse a un simple efecto estadístico. Aunque esta opción no es descartable, resulta llamativo el hecho de que las dos medidas finales de CDF y D0, así como todas las anteriores (con menos datos) y otras relacionadas se hayan situado siempre por encima de las predicciones teóricas. Este comportamiento no es el que cabe esperar de las fluctuaciones estadísticas, las cuales deberían distribuir los resultados tanto por encima como por debajo del valor real.

Otra posibilidad reside en la existencia de errores sistemáticos en alguno de los experimentos del Tevatrón. De ser así, ¿en cuál de ellos? Necesitaríamos un tercer experimento independiente para resolver la cuestión. Pero, por desgracia, algo así es imposible, ya que el Tevatrón dejó de funcionar hace cuatro años.

En cuanto a los resultados del LHC, llama también la atención que todos ellos —en particular, el último valor obtenido por CMS— se sitúen por debajo de las predicciones teóricas. ¿Hay algo que somos incapaces de ver? ¿O tal vez estas discrepancias se deben a un efecto sistemático derivado de nuestra limitada comprensión de las interacciones fuertes a baja energía? Por último, aunque las mediciones de la asimetría de carga en el LHC resultan útiles para investigar la anomalía en A_{FB}, no pueden refutarla, ya que se trata de dos cantidades independientes.

El futuro

Aunque las medidas actuales del LHC no permiten validar ni refutar las del Tevatrón, dentro de poco dispondremos de más información gracias a la gran cantidad de datos que espera obtener el LHC en su segunda fase de operaciones, la cual comenzó el año pasado. Ello permitirá efectuar diferentes medidas de A_C en distintas regiones cinemáticas y, con suerte, determinar si hay o no nueva física en la producción de pares $t\bar{t}$.

Otra posibilidad de gran interés consistirá en medir las asimetrías en la producción de pares $t\bar{t}$ más un fotón o un bosón W. Estos procesos con una partícula adicional son relativamente exóticos, por lo que hasta el momento los resultados carecen de la precisión necesaria. La energía de las colisiones que llevará a cabo el LHC en esta segunda fase de operaciones, mucho mayor que en la primera, permitirá explorarlos en detalle. Si hay alguna contribución de nuevos fenómenos físicos a tales procesos, es posible que su existencia se revele en la producción de pares $t\bar{t}$ más un fotón o un bosón W.

La historia reciente de la asimetría A_{FB} nos proporciona un ejemplo de cómo funciona el método científico. Supone también un precedente para considerar con cautela otras anomalías que se observen en el LHC, como el enigmático exceso en la producción de pares de fotones que fue anunciado el pasado mes de diciembre. Sea cual fuere el final de la historia, aún por escribir, lo cierto es que nos ha brindado una oportunidad única para profundizar en nuestro entendimiento de la partícula elemental más masiva que conocemos. Ello será de inmensa utilidad tanto en el LHC como en los demás experimentos de física de partículas que se lleven a cabo en el futuro.

—Juan Antonio Aguilar Saavedra
Dpto. de física teórica y del cosmos
Universidad de Granada
y colaboración ATLAS

PARA SABER MÁS

Measurement of the top quark forward-backward production asymmetry and its dependence on event kinematic properties. Colaboración CDF en *Physical Review D*, vol. 87, art. 092002, mayo de 2013. Disponible en **arxiv.org/abs/1211.1003**

Measurement of the forward-backward asymmetry in top quark-antiquark production in $p\bar{p}$ collisions using the lepton+jets channel. Colaboración D0 en *Physical Review D*, vol. 90, art. 072011, octubre de 2014. Disponible en **arxiv.org/abs/1405.0421**

Asymmetries in top quark pair production at hadron colliders. J. A. Aguilar-Saavedra et al. en *Reviews of Modern Physics*, vol. 87, págs. 421-455, mayo de 2015. Disponible en **arxiv.org/abs/1406.1798**

EN NUESTRO ARCHIVO

El descubrimiento del quark *cima*. Tony M. Liss y Paul L. Tipton en *IyC*, diciembre de 1997.

El quark *cima* se pone en movimiento. Marcel Vos y Miguel Villaplana en *IyC*, abril de 2015.

El juego de las bacterias

El análisis del polvo doméstico revela que la presencia de hombres, mujeres, gatos o perros influye en la diversidad bacteriana del hogar

Los estudios demuestran que los hombres dispersan más bacterias en derredor que las mujeres. Ahora se ha descubierto que la diversidad bacteriana presente en el hogar depende del sexo de sus moradores. La variación tiene su origen en la biología de la piel y tal vez en la talla corporal y los hábitos higiénicos, apuntan los investigadores que secuenciaron los genes del polvo acumulado sobre el cabio superior de las puertas de 1200 domicilios de todo Estados Unidos. Parece que los perros alteran más la microbiota bacteriana doméstica que las personas o los gatos. Las bacterias características de cada uno de ellos son lo bastante peculiares como para que, con un simple análisis del polvo, podamos saber con exactitud si bajo ese techo conviven más hombres que mujeres, y si también hay perros o gatos. —*Mark Fischetti*

¿Tiene usted perro?
NO
SI
¿Tiene usted gato?
¿Tiene usted gato?
¿En su casa hay más varones que hembras?
¿En su casa hay más varones que hembras?
¿En su casa hay más varones que hembras?
¿En su casa hay más varones que hembras?
¿En su casa hay más hembras que varones?
¿En su casa hay más hembras que varones?
¿En su casa hay más hembras que varones?
¿En su casa hay más hembras que varones?

Las bases del juego

Hombres, mujeres, gatos y perros dejan tras de sí un delator rastro de bacterias en el seno del hogar. Siga las preguntas (*círculos*) desde arriba para hallar las diferencias. Los investigadores forenses pueden basarse en los datos de las bacterias características de cada individuo, en el extremo inferior (*puntos*), para determinar el tipo de mascotas y el sexo de los habitantes humanos del domicilio.

Clave Diferencia respecto al valor de referencia*

–32x –16x –8x –4x –2x Referencia 2x 4x 8x 16x 32x

Resultado sólido ($p < 0{,}01$)
Resultado poco sólido ($p < 0{,}05$)

* *El punto de referencia de cada categoría corresponde a la configuración opuesta a la mostrada. Por ejemplo, los puntos del hogar donde predominan los varones y vive un gato (el sexto desde la izquierda) revelan las diferencias de la microbiota bacteriana respecto a los demás hogares donde los varones no son mayoría y no habita ningún felino.*

Corynebacterium
Lactobacillus
Porphyromonas
Moraxella
Jeotgalicoccus
Sporosarcina
Roseburia
Collinsella
Megamonas
Pasteurella
Helicobacter
Catenibacterium
Dermabacter
Treponema

Más abundantes
Menos abundantes

HOGARES
INDIVIDUOS

FUENTE: «THE ECOLOGY OF MICROSCOPIC LIFE IN HOUSEHOLD DUST», POR ALBERT BARBERÁN ET AL., EN *PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY B*, VOL. 282, SEPTIEMBRE DE 2015; MARTIN KRZYWINSKI Y B. JEANNIE HUNNICUTT (*gráfico*)

SOSTENIBILIDAD

El Mediterráneo, un delicado océano en miniatura

El recién finalizado proyecto PERSEUS ha identificado amenazas nuevas que acechan a nuestro mar y ha ofrecido herramientas para la toma de decisiones de gestores y políticos

JAVIER RUIZ Y JOAQUÍN TINTORÉ

El Mediterráneo está sometido a una intensa presión humana, en gran parte debido a sus escasas dimensiones y a la elevada población de los países que lo rodean. ¿Cómo se puede conocer su estado de salud y las amenazas que lo acechan?

Decenas de instituciones y más de trescientos investigadores de países ribereños han unido sus esfuerzos en el proyecto PERSEUS (acrónimo, en inglés de «Investigación orientada a la implementación de políticas ambientales en los mares del sur de Europa») para intentar obtener una visión global de este mar, conocer las presiones a las que está sujeto y determinar las consecuencias de estas. Durante cuatro años han analizado imágenes de satélite, fondeado equipos de medida en la costa y en el océano profundo, realizado campañas oceanográficas, examinado sedimentos en busca de contaminantes emergentes, explorado la aparición masiva de medusas en sus playas, analizado los colapsos en pesquerías, estudiado las corrientes mediante robots autónomos y generado modelos matemáticos para entender el funcionamiento de la física y biología de este mar; y, quizá lo más relevante, han compartido toda esa información en un foro común en el que los países de Europa y África no han conocido fronteras, como tampoco las conoce su mar común.

Los resultados de este enorme esfuerzo colectivo pueden consultarse en la página web del proyecto, que ha sido financiado por la Unión Europea (www.perseus-net.eu). Algunos de ellos no transmiten un mensaje tan dramático sobre el estado de este mar como a menudo se muestra en los medios de comunicación. Apuntan, por ejemplo, a que las normativas adoptadas en el pasado para mitigar el vertido antropogénico de nitrógeno o fósforo están teniendo ya efectos positivos para el conjunto de la cuenca, con una reducción de los niveles de eutrofización. También se han relajado algunas preocupaciones en sectores como el turístico, que sufrió durante el verano de 2010 la incertidumbre que generaba el supuesto establecimiento en el Mediterráneo de una población permanente de carabela portuguesa, una medusa que puede provocar picaduras mortales. Tal suposición ha sido descartada; PERSEUS ha demostrado que se trató de un evento excepcional asociado a las corrientes en el estrecho de Gibraltar.

Principales perturbaciones

Además de esos aspectos positivos, PERSEUS también ha ofrecido una visión global sobre las amenazas que sufren los ecosistemas marinos. Entre ellas resulta especialmente inquietante la continua aparición de especies exóticas, que pueden generar cuantiosas pérdidas tanto ambientales como económicas. Estas especies son introducidas en el Mediterráneo por el tráfico marítimo y se prevé que su ritmo de aparición se incrementará con el comercio mundial y con la ampliación del canal de Suez.

El conocimiento científico generado por el proyecto ha permitido identificar amenazas latentes de las que no teníamos conocimiento previo. De este modo, se ha constatado la rapidez con la que los contaminantes pueden transitar desde los focos de contaminación en la costa hasta las zonas más profundas de este mar. Ello significa que, si se dan las condiciones oceanográficas adecuadas, un vertido de contaminantes en un punto concreto del litoral se dispersará en cuestión de semanas por las regiones más profundas del Mediterráneo, unas zonas que considerábamos prístinas y poco afectadas por las actividades humanas.

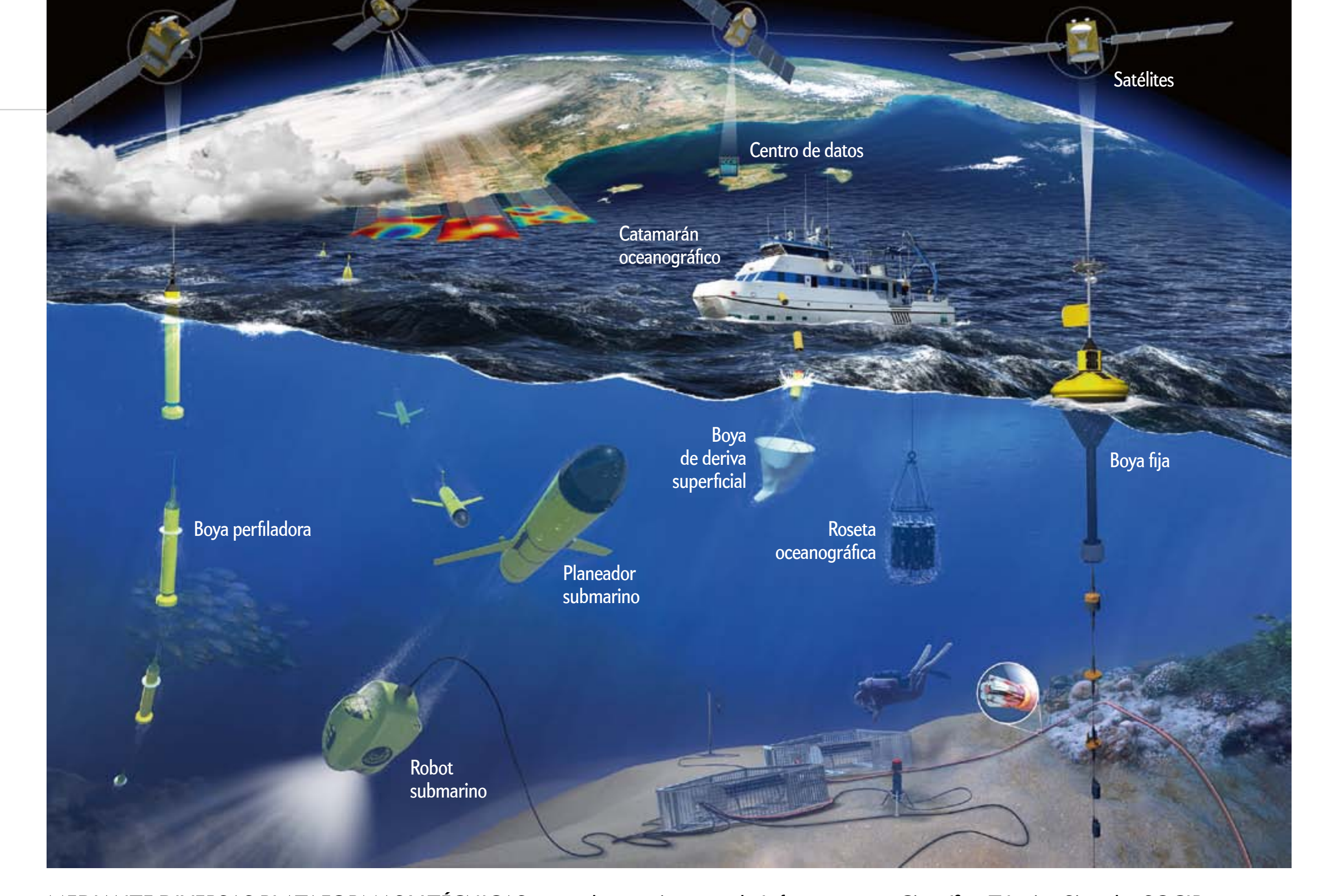
Los resultados obtenidos también evidencian la presión que ejercen los desechos humanos en el conjunto del Mediterráneo. Los datos constatan una proliferación alarmante de basura tanto en el mar abierto como en la costa, una situación preocupante si se tiene en cuenta que el 95 por ciento de los residuos son plásticos con una larga vida media.

A estas perturbaciones —que son recientes, se están intensificando o adquieren dimensiones nuevas a la luz del conocimiento científico generado— hay que añadir otras que se han ido acumulando a lo largo del tiempo. Entre ellas destaca la explotación pesquera de los recursos vivos. Cuando esta es excesiva, conlleva una merma de la biodiversidad del Mediterráneo, en especial si se emplean artes como el arrastre de fondo, que daña los hábitats de esta zona. Son algunas de las amenazas identificadas en el proyecto y que los países ribereños deben abordar para legar al futuro un Mediterráneo saludable.

Herramientas para la gestión

De hecho, el conjunto del trabajo realizado en PERSEUS hay que encuadrarlo en la Directiva Marco sobre la Estrategia Marina aprobada por la Unión Europea, que pretende avanzar hacia un mar saludable en las próximas décadas. Para contribuir a este esfuerzo, PERSEUS no ha actuado únicamente como notario de los cambios positivos o negativos que está sufriendo la cuenca. El proyecto ha generado herramientas concretas para que el conocimiento científico pueda ser utilizado en la toma de decisiones de gestores y políticos.

De este modo, PERSEUS ha dividido el Mediterráneo en diversas regiones que pueden ser tratadas como unidades de gestión, tanto por la fauna y flora que albergan como por los procesos físicos que subyacen en sus masas de agua. La colaboración entre ingenieros y ecólogos ha permitido generar una herramienta específica para que los grandes puertos del Mediterráneo puedan evaluar y mejorar sus políticas ambientales. PERSEUS también ha realizado recomendaciones concretas para limitar el impacto de la basura sobre la costa y el mar abierto. La conjunción de las experiencias de un consorcio formado por una selección de los mejores expertos en el Mediterráneo ha significado, además, una importante ayuda en el asesoramiento de acuerdos in-



MEDIANTE DIVERSAS PLATAFORMAS Y TÉCNICAS, como las que integran la Infraestructura Científico Técnica Singular SOCIB (Sistema de Observación Costero de las Islas Baleares), el proyecto PERSEUS ha realizado un seguimiento de numerosos parámetros del Mediterráneo, entre ellos, la salinidad, la temperatura, el oxígeno disuelto o la clorofila, así como de su biodiversidad, contaminantes, medusas o la intrusión de especies exóticas.

FUENTE: SISTEMA DE OBSERVACIÓN COSTERO DE LAS ISLAS BALEARES

ternacionales que fueron diseñados para proteger este mar, como el Convenio de Barcelona para la protección del mar Mediterráneo de la contaminación.

Entre los legados más valiosos que dejará PERSEUS se encuentra la estrategia para establecer un sistema de observación con el que tener una visión global del Mediterráneo y de sus respuestas a desafíos como el cambio climático. El análisis de los esfuerzos que están realizando los diversos países para obtener información científica ha desvelado que existen importantes lagunas en la mitad sur de nuestro mar. Esta escasez de datos en el Mediterráneo africano conlleva importantes incertidumbres a la hora de generar una imagen global del mismo. Existe igualmente un contraste entre la cantidad de información disponible para los elementos físicos del ecosistema (temperatura, salinidad, corrientes...) y los biológicos (plancton, medusas, biodiversidad...), que resultan mucho más escasos. Se necesita investigar más a fondo cómo se relacionan entre sí los procesos de circulación que tienen lugar en el Mediterráneo a diferentes escalas y cómo modifican su circulación global. Debido a su reducida extensión, en nuestro mar son especialmente importantes los procesos y remolinos de mesoescala (que son el equivalente marino a los frentes y borrascas en la atmósfera). Debemos desentrañar mejor su naturaleza, pues resultan determinantes en el funcionamiento de los ecosistemas, en el modo en que las poblaciones de especies marinas se interconectan entre sí o en los mecanismos de dispersión de los contaminantes en la cuenca.

Para responder a todas esas preguntas será necesario el uso intensivo de diferentes plataformas de observación (satélites, barcos, vehículos autónomos, boyas derivantes, fondeos) y también de técnicas clásicas (sensores de temperatura, presión, salinidad) y novedosas (visión por computador, biosensores), todas ellas integradas gracias a modelos matemáticos que permiten asimilar las observaciones realizadas para entender mejor el funcionamiento del ecosistema y hacer predicciones sobre sus estados futuros.

Para generar una visión integral del Mediterráneo deberán armonizarse e integrarse las observaciones que realizan los diferentes países ribereños. PERSEUS ha iniciado el camino para que ese conjunto de datos se obtenga con una estrategia que englobe toda la cuenca. Los conocimientos que se ganen de este modo deberán proyectarse después hacia la sociedad en formatos que ayuden al diseño de políticas y a la toma de decisiones, de manera que el *Mare Nostrum* pueda seguir proveyendo cultural, económica y ambientalmente a los que hicieron de él la cuna de la civilización occidental.

—Javier Ruiz
Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía, CSIC.
—Joaquín Tintoré
Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados, CSIC.

PARA SABER MÁS

A MSFD complementary approach for the assessment of pressures, knowledge and data gaps in Southern European Seas: The PERSEUS experience. A. Crise et al. en *Marine Pollution Bulletin*, vol. 95, n.º 1, págs. 28-39, junio de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

La salud del mar Mediterráneo. Joandomènec Ros en *IyC*, agosto de 1994.

***Mare nostrum*. Un modelo a examen.** Marta Estrada en *IyC*, abril de 1998.

LAS EXTRAÑAS ÓRBITAS de varios objetos del cinturón de Kuiper, más allá de Neptuno, sugieren la existencia de un gran planeta oculto en los arrabales del sistema solar. Esta recreación artística lo representa junto a su propia luna.

ESPACIO

EN BUSCA DEL



PLANETA X

En los confines del sistema solar podría esconderse un planeta mayor que la Tierra

Michael D. Lemonick

Michael D. Lemonick es autor de *Mirror Earth: The search for our planet's twin* («Segunda Tierra: En busca de nuestro planeta gemelo», Walker Books, 2012). Ha escrito sobre ciencia durante más de veinte años para la revista *Time*.



ALGO MUY EXTRAÑO PARECE ESTAR OCURRIENDO MÁS ALLÁ DE PLUTÓN. LOS ASTRÓNOMOS saben desde hace más de dos décadas que este planeta enano no está solo en los confines del sistema solar: forma parte del cinturón de Kuiper, la extensa nube de cuerpos helados que se mueven más allá de Neptuno. Al igual que los planetas y los asteroides, los cuales orbitan entre Marte y Júpiter, la mayoría de los objetos del cinturón de Kuiper describen trayectorias más o menos circulares alrededor del Sol. Sin embargo, existe un pequeño grupo de ellos cuyas órbitas resultan ciertamente atípicas, mucho más alargadas de lo que cabría esperar.

Estos objetos anómalos —entre cuatro y una docena, dependiendo de quién cuente— comparten otra peculiaridad orbital. Como ocurre con la mayoría de los objetos del cinturón de Kuiper (KBO, por sus siglas en inglés), sus trayectorias forman un ángulo con el plano en que se mueven los planetas: una parte del tiempo se elevan sobre él, luego lo atraviesan y después continúan por debajo. Pero, a diferencia de sus hermanos helados, estos objetos peculiares cruzan el plano de los planetas casi en el mismo momento en que más cerca se encuentran del Sol. O, usando un término que resulta arcano hasta para muchos astrónomos, tienen argumentos del perihelio muy similares.

«En circunstancias normales», explica Scott Sheppard, científico planetario de la Institución Carnegie para la Ciencia, «uno esperaría que los argumentos del perihelio se hubieran vuelto aleatorios en el transcurso de la historia del sistema solar». Que estos objetos terminasen con el mismo argumento del perihelio podría no ser más que una coincidencia: por pura casualidad, sucedería un pequeño porcentaje de las veces. La probabilidad es similar a la de lanzar una moneda y obtener diez caras seguidas. Poco habitual, pero ni mucho menos imposible.

Sin embargo, esas diez caras también podrían indicar que la moneda está trucada. Lo mismo ocurre con los KBO anómalos: tal vez haya algo que explique su extraña configuración. Y, según algunos expertos, la causa podría ser un enorme planeta oculto en los confines del sistema solar: una supertierra (nombre genérico que reciben los planetas con una masa de hasta diez veces la terrestre). También conocido como «Planeta X», si este mundo lejano existiese, orbitaría al menos diez veces más lejos del Sol que Neptuno. Se encontraría tan distante y brillaría tan poco que ningún telescopio lo habría detectado hasta la fecha, pero su considerable masa ejercería efectos gravitatorios sobre el resto del sistema solar. Ello podría explicar las extrañas órbitas de algunos cuerpos transneptunianos.

«Aún no tenemos pruebas concluyentes de que en esa zona exista un objeto de masa planetaria», señala Nathan Kaib, experto en formación de planetas que también trabaja en la Institución Carnegie, «pero está pasando algo muy curioso que no entendemos». De hecho, cada vez hay más astrónomos que dan crédito a la idea, antes ridiculizada, de que hay una supertierra entre nosotros: el Planeta X.

Como dice Kaib, las pruebas que apuntan a la existencia de un planeta oculto no son ni mucho menos irrefutables. Numerosos astrónomos siguen poniendo en duda la idea, e incluso quienes la consideran posible admiten que aún no están totalmente convencidos. La historia de la astronomía está llena de misteriosos planetas invisibles cuya existencia se infirió a partir de las peculiares órbitas de otros objetos. A veces fueron grandes descubrimientos; otras, falsas alarmas. Pero es posible que no conozcamos nuestro sistema solar tan bien como pensábamos. Si el Planeta X existe, será necesario reescribir por completo algunos capítulos clave de su historia.

EN SÍNTESIS

Una serie de objetos helados y distantes que describen extrañas órbitas alrededor del Sol han llevado a algunos científicos a sospechar que en el sistema solar puede haber más planetas de los que conocemos.

Varios indicios apoyan la idea de que una o más «supertierras» (planetas con una masa de hasta diez veces la de la Tierra) podrían orbitar mucho más allá de Neptuno.

Esos astros serían demasiado tenues y distantes para observarlos con los telescopios actuales. Pero, si realmente existen, tal vez puedan detectarse en el futuro.

RON MILLER (*páginas anteriores*)

TRAS LA PISTA DE MUNDOS OCULTOS

La primera búsqueda de un planeta oculto alrededor del Sol tuvo lugar a principios del siglo XIX. Por aquella época, fue creciendo el convencimiento de que Urano, descubierto de manera accidental en 1781 por el músico reconvertido en astrónomo William Herschel, no orbitaba exactamente como predecía la ley de Newton. Varios científicos propusieron que eso se debía a la influencia gravitatoria de un gran planeta aún no detectado. Y, en 1846, el astrónomo alemán Johan Galle observó el gigante gaseoso Neptuno esencialmente donde su colega francés Urbain Le Verrier había calculado que debía encontrarse. (En realidad, hay indicios bastante fehacientes de que Galileo ya había visto Neptuno en 1612 con su pequeño y rudimentario telescopio, aunque supuso que se trataba de una estrella.)

En la década de 1900, Percival Lowell, un aristócrata de Boston, emprendió en su observatorio de Flagstaff, en Arizona, la búsqueda de otro planeta oculto. Esta vez sirvieron como indicios las anomalías de las órbitas de Urano y Neptuno, las cuales apuntaban a la existencia de otro planeta gigante. A principios de 1930, Clyde Tombaugh, un joven ayudante del Observatorio Lowell, descubrió un planeta más o menos donde predecían los cálculos, una situación calcada al descubrimiento de Neptuno. «La esfera, posiblemente mayor que Júpiter y situada a 4.000.000.000 millas de distancia, se ajusta a las predicciones», anunció *The New York Times* el 14 de marzo de 1930.

Sin embargo, no ocurrió así. Unas décadas después quedó claro que Plutón no era ni mucho menos del tamaño de Júpiter; en realidad, es menor que la Luna. Su débil campo gravitatorio nunca podría explicar las anomalías observadas en las órbitas de Urano y Neptuno. Y así tenía que ser, pues estas desaparecieron una vez se efectuaron investigaciones más detalladas. En este sentido, Plutón resultó una falsa alarma.

No obstante, el descubrimiento de aquel pequeño mundo fue de una importancia extraordinaria. Para la década de 1980, ya se había empezado a sospechar que Plutón no orbitaba solo en los helados arrabales del sistema solar, sino que se trataba del objeto más brillante de una región inmensa y muy poblada, el cinturón de Kuiper. En 1992, un telescopio de Hawái detectó el primer KBO (aparte de Plutón); desde entonces, se han avistado unos 1500 cuerpos más. En 2005, el descubrimiento de Eris, un objeto similar a Plutón en tamaño pero con una masa considerablemente mayor, amenazó con inundar el sistema solar de nuevos planetas. Un año más tarde, el fantasma de esa posibilidad empujó a la Unión Astronómica Internacional a degradar a Plutón de planeta a planeta enano [*véase* «Definición de planeta», por Steven Soter; Investigación y Ciencia, marzo de 2007].

LA REORGANIZACIÓN DEL SISTEMA SOLAR

Al mismo tiempo, el descubrimiento del cinturón de Kuiper otorga credibilidad a la hipótesis de un objeto de masa planetaria situado en los confines del sistema solar, ya que ayuda a explicar cómo un cuerpo semejante pudo haber acabado tan lejos del Sol como para no verlo. Según indican las simulaciones por ordenador, los cuerpos helados del cinturón de Kuiper se formaron en las inmediaciones de la órbita que hoy describe Neptuno y, más tarde, algo los dispersó hasta sus posiciones actuales. Eso ha llevado a suponer que, después de que los planetas se formasen a partir del disco de gas y polvo que rodeaba al Sol recién nacido, tuvo lugar un período caótico en el que alguna perturbación redistribuyó los cuerpos del sistema solar. Lo más probable es que, durante esa época inestable, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno se desplazaran a cientos de millones de kilómetros de sus órbitas iniciales y que su gravedad lanzase los KBO hacia la periferia. Algunas simulaciones incluso señalan la posible existencia de un quinto gigante gaseoso, el cual habría sido expulsado por completo cuando los demás planetas modificaron sus posiciones.

Si había una supertierra, es muy posible que también saliese despedida durante aquel período de caos generalizado. Y dado que las supertierras han resultado ser comunes entre los aproximadamente 2000 exoplanetas que, durante los últimos veinte años, se han descubierto en torno a otras estrellas, parece razonable suponer que en algún momento pudo haber una alrededor del Sol. Ben Bromley, de la Universidad de Utah, explica que, con esa idea en mente, él y Scott Kenyon, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, llevaron a cabo algunas simulaciones burdas de lo que le pasaría a una supertierra que fuera proyectada desde la región donde hoy se encuentran Júpiter y Saturno. En la mayoría de los casos, encontraron que el objeto sería arrojado a una órbita muy elíptica, la cual iría estirándose poco a poco hasta acabar expulsando definitivamente al planeta del sistema solar. Pero, si la dispersión hubiese ocurrido lo suficientemente pronto (durante los primeros 10 millones de años desde la formación de los planetas, antes de que el gas protoplanetario se disipara), la supertierra habría podido interaccionar gravitacionalmente con el gas e instalarse en una zona remota con una órbita más o menos circular, apunta Bromley.

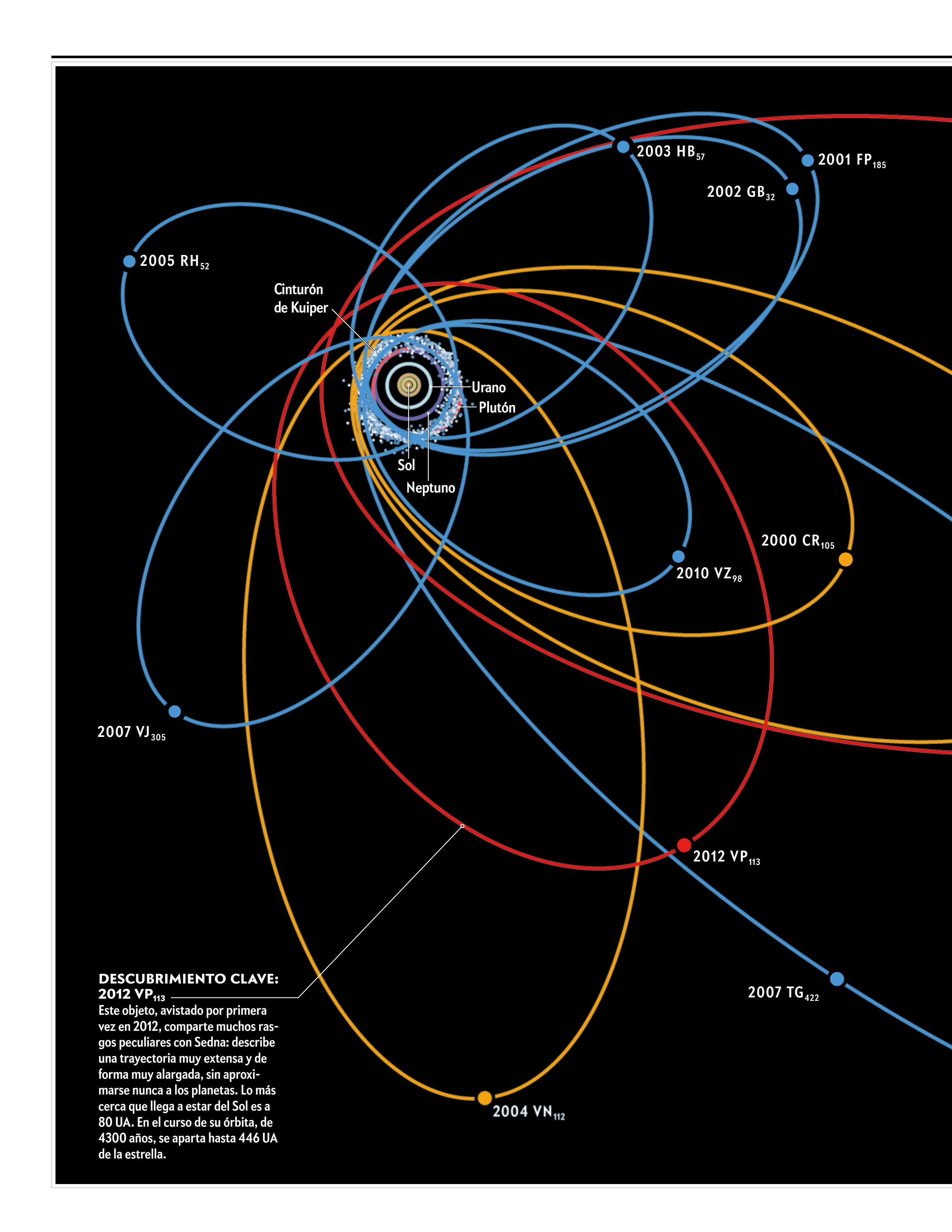
Ese escenario permitiría obtener un planeta de gran masa como el que Lowell se propuso buscar en la década de 1900 o como el que Le Verrier y Galle acabaron encontrando cuando este último avistó Neptuno medio siglo antes. Pero Kenyon y Bromley hallaron otra posibilidad: que la supertierra se hubiese formado directamente en esa zona remota, a unas 200 unidades astronómicas (UA) del Sol; es decir, 200 veces la distancia de 150 millones de kilómetros que hay entre el Sol y la Tierra. (Neptuno, en comparación, orbita a unas 30 UA del Sol.) Dicha formación in situ solo sería posible si, a tales distancias, hubiera suficiente material para formar planetas: trozos de roca y hielo del tamaño de un guijarro.

No existen pruebas directas de que algo así haya ocurrido en el sistema solar. Sin embargo, hay indicios bastante sólidos de dicho proceso en estrellas muy similares al Sol. «Si nos fijamos en estrellas cercanas parecidas al Sol», señala Kenyon, «veremos que algunas de ellas presentan discos de escombros que se extienden hasta unas 200 UA de la estrella. Así que existen precedentes». Y si bien no hay pruebas de que alrededor de dichas estrellas se hayan formado supertierras tan lejanas, «por lo menos los ingredientes básicos están ahí», observa el investigador. Todas estas simulaciones tenían un carácter puramente especulativo cuando Kenyon y Bromley comenzaron a trabajar en ellas, hace unos diez años. Por entonces, no había el menor indicio de que el sistema solar pudiese albergar una supertierra.

SEDNA

Todo cambió con el descubrimiento de Sedna. En 2003, Mike Brown, del Instituto de Tecnología de California, encontró junto con dos colaboradores el que posiblemente fuese el objeto más extraño jamás descubierto en el sistema solar: un cuerpo helado de unos 1000 kilómetros de diámetro, similar en muchos aspectos a Plutón, Eris y otros KBO, pero con una órbita nunca

Continúa en la página 25


2003 HB57
2001 FP185
2002 GB32
2005 RH52
Cinturón de Kuiper
Urano
Plutón
Sol
Neptuno
2000 CR105
2010 VZ98
2007 VJ305
2012 VP113
2007 TG422
2004 VN112
DESCUBRIMIENTO CLAVE: 2012 VP113
Este objeto, avistado por primera vez en 2012, comparte muchos rasgos peculiares con Sedna: describe una trayectoria muy extensa y de forma muy alargada, sin aproximarse nunca a los planetas. Lo más cerca que llega a estar del Sol es a 80 UA. En el curso de su órbita, de 4300 años, se aparta hasta 446 UA de la estrella.

Objetos exteriores extremos

En el cinturón de Kuiper, la gran nube de cuerpos helados que orbitan más allá de Neptuno, se han avistado alrededor de una docena de objetos que describen trayectorias extrañas. Todos ellos siguen órbitas muy oblongas alrededor del Sol y parecen compartir una característica peculiar: su máxima aproximación al astro tiene lugar aproximadamente cuando atraviesan el plano que contiene a los planetas y los asteroides. Esa sincronización podría explicarse a partir de la atracción gravitatoria de una «supertierra», o planeta de gran tamaño, situada en los confines del sistema solar.

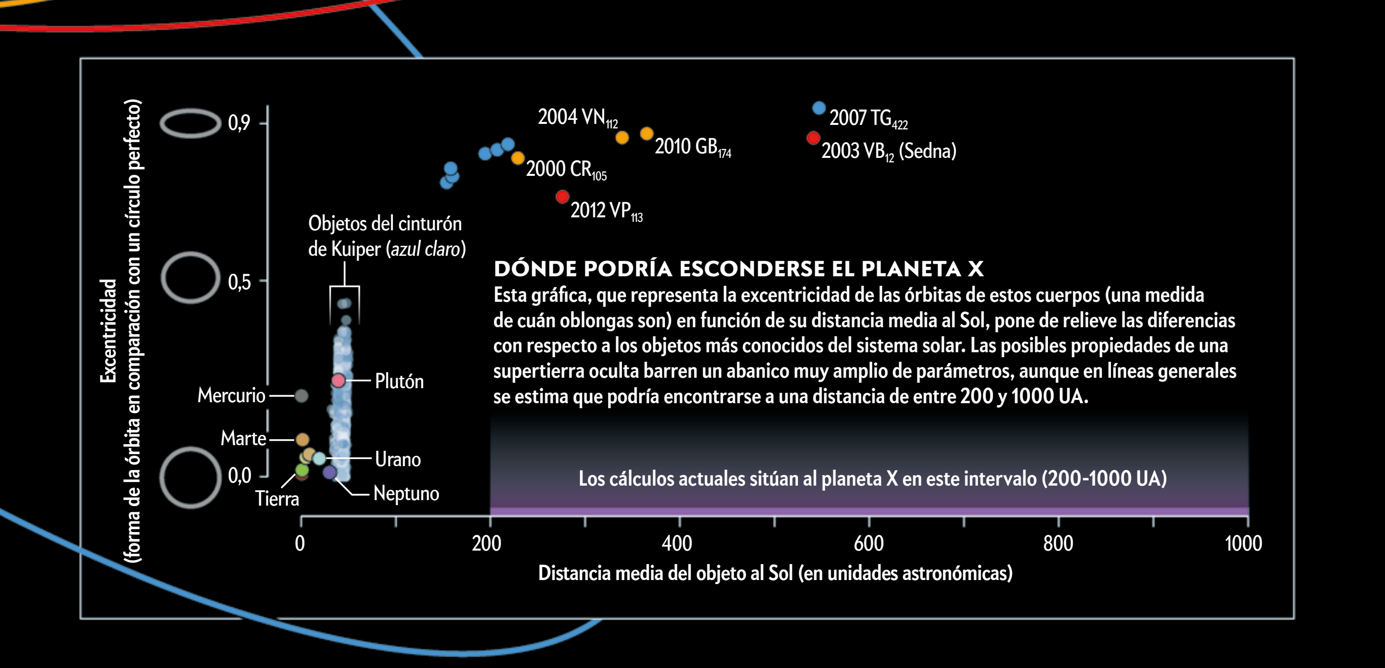
OTROS 10 OBJETOS EXTREMOS
Los astrónomos han observado al menos otros 10 cuerpos que comparten algunas características con Sedna y 2012 VP_{113}, como una órbita muy alargada que cruza el plano de los planetas casi cuando su cercanía al Sol es mayor. Todos ellos tienen distancias medias al Sol de al menos 150 UA y pueden dividirse en tres categorías en función de su perihelio, o punto más próximo al Sol: los que nunca se acercan a menos de 50 UA (la «nube de Oort interior»), los que llegan a entre 40 y 50 UA del Sol (el «disco disperso extendido») y el «disco disperso» de objetos que se aproximan a distancias de entre 30 y 40 UA.

Objetos extremos conocidos en el sistema solar exterior
- Nube de Oort interior
- Disco disperso extendido
- Disco disperso

2003 VB_{12} (Sedna)

DESCUBRIMIENTO CLAVE: SEDNA
Descubierto en 2003, Sedna es uno de los objetos del sistema solar más distantes que se conocen. Su órbita, muy alargada, es posiblemente la más extraña observada hasta ahora. Esta roca helada de unos 1000 kilómetros de diámetro llega a alejarse a 930 UA (1 UA es la distancia entre la Tierra y el Sol) del centro del sistema solar, nunca se aproxima a menos de 76 UA y tarda 11.400 años en describir una vuelta completa alrededor del Sol.





DÓNDE PODRÍA ESCONDERSE EL PLANETA X
Esta gráfica, que representa la excentricidad de las órbitas de estos cuerpos (una medida de cuán oblongas son) en función de su distancia media al Sol, pone de relieve las diferencias con respecto a los objetos más conocidos del sistema solar. Las posibles propiedades de una supertierra oculta barren un abanico muy amplio de parámetros, aunque en líneas generales se estima que podría encontrarse a una distancia de entre 200 y 1000 UA.

FUENTES: LISTA DE OBJETOS TRANSNEPTUNIANOS DEL CENTRO DE PLANETAS MENORES DE LA UNIÓN ASTRONÓMICA INTERNACIONAL (*datos de objetos del cinturón de Kuiper*); SCOTT S. SHEPPARD, INSTITUCIÓN CARNEGIE PARA LA CIENCIA (*datos de objetos extremos del sistema solar exterior*); WILLEM TULP (*gráficos*)

¿Se ha encontrado el Planeta Nueve?

Un nuevo trabajo ha argumentado a favor de la existencia de un planeta gigante a unas 700 unidades astronómicas del Sol. La propuesta, sin embargo, deja varias incógnitas sin resolver

PABLO SANTOS SANZ

El pasado mes de enero, en un artículo publicado en *The Astronomical Journal*, los investigadores de Caltech Konstantin Batygin y Michael Brown propusieron la existencia de un noveno planeta en el sistema solar. En su trabajo, los autores intentan explicar las extrañas órbitas de algunos objetos situados en el cinturón transneptuniano. Tras ejecutar en un potente ordenador una serie de simulaciones, habrían conseguido reproducir las órbitas de seis de esos cuerpos al introducir en su modelo un planeta con una masa de al menos diez veces la terrestre. Ese hipotético astro, al que han llamado Planeta Nueve, se movería en una órbita muy elíptica, con un semieje mayor de unas 700 unidades astronómicas (UA), y tardaría unos 15.000 años en completar una vuelta al Sol. Si bien se trata de una hipótesis interesante, la propuesta no es nueva y deja varias preguntas abiertas.

Desde el descubrimiento del primer objeto transneptuniano (aparte de Plutón) en 1992, se han hallado casi 1500 de estos cuerpos. Muchos de ellos exhiben características peculiares. Algunos siguen órbitas muy inclinadas con respecto al plano eclíptico (el que contiene al resto de los planetas); otros presentan órbitas muy elípticas. Varios de ellos, los de mayor tamaño, tienen superficies que reflejan en grado extremo la luz solar —más que los mejores espejos—, mientras que otros muestran un aspecto muy oscuro, similar al del carbón.

El tamaño típico de los objetos transneptunianos descubiertos hasta ahora oscila entre los cientos y los miles de kilómetros. Algunos de ellos, como Plutón, Eris o Makemake, son considerados planetas enanos, ya que presentan una forma esférica mantenida por su propia gravedad. Casi todos los que se encuentran entre las 30 y las 50 UA del Sol se ven afectados por la influencia gravitatoria de Neptuno. Otros, sin embargo, escapan a ella. Así ocurre con Sedna, un objeto muy peculiar cuya órbita lo lleva a alejarse hasta 937 UA del Sol.

Dadas sus enormes distancias al Sol, todos estos cuerpos se encuentran congelados. En cierto sentido, pueden considerarse «cápsulas del tiempo» con información muy valiosa sobre el origen y evolución del sistema solar. Por esa razón, sus inusitadas propiedades revisten gran interés para los astrónomos.

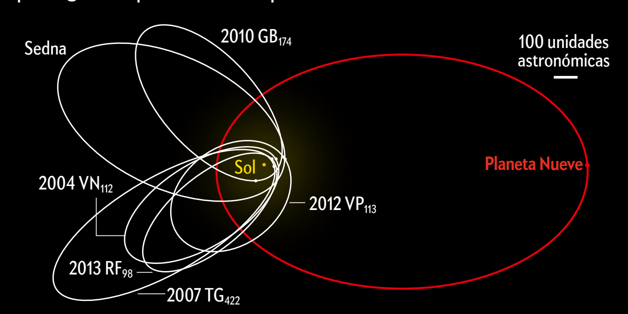
Antecedentes del Planeta Nueve

En el pasado, varios investigadores han tratado de explicar las extrañas órbitas de algunos de estos objetos postulando la existencia de uno o varios cuerpos ocultos en los arrabales del sistema solar. Por mencionar algunos ejemplos, ya en 1999, John Matese y otros investigadores de la Universidad de Louisiana argumentaban a favor de la existencia de un objeto de 1,5 veces la masa de Júpiter que daría cuenta de las órbitas de algunos cometas. En 2002, Adrian Brunini, de la Universidad Nacional de La Plata, y Mario Melita, ahora en el Instituto de Astronomía y Física del Espacio de Buenos Aires, propusieron un cuerpo con una masa muy similar a la de Marte a unas 60 UA del Sol para explicar la distribución de los objetos transneptunianos clásicos.

En un artículo publicado en 2006 por Rodney Gomes, del Observatorio Nacional de Brasil, y otros autores se habla de un hipotético planeta con la masa de Neptuno o Júpiter situado a unas 2000 o 5000 UA del Sol, el cual permitiría entender las órbitas de los objetos transneptunianos desligados de la influencia de Neptuno. En 2007, José Luis Ortiz, el autor de estas líneas y otros investigadores del Instituto de Astrofísica de Andalucía propusimos la existencia de un pequeño planeta a más de 120 UA del Sol basándonos en la órbita de Eris. Un año después, Patryk Lykawka y Tadashi Mukai, por entonces ambos en la Universidad de Kobe, argumentaron a favor de un planeta con una masa menor que la terrestre situado a más de 100 UA del Sol como posible explicación de la estructura observada en el cinturón transneptuniano.

Puntos débiles

Batygin y Brown estudian objetos libres de la influencia gravitatoria de Neptuno y cuyas órbitas presentan semiejes mayores de más de 150 UA. Obtienen un total de 14 cuerpos con tales características. De ellos, seleccionan seis con perihelios situados en regiones próximas del espacio y órbitas alineadas. Es este alineamiento lo que logran explicar con la hipótesis del Planeta Nueve.



Órbitas de los seis objetos transneptunianos analizados por Batygin y Brown (*blanco*) y del hipotético Planeta Nueve (*rojo*).

Según los autores, que esos cuerpos hayan sido descubiertos por programas de rastreo independientes evitaría cualquier sesgo; sin embargo, la manera de seleccionarlos implica un sesgo en sí mismo. Otro punto débil radica en que su modelo solo emplea seis objetos transneptunianos, si bien harían falta más para sustentar sus hipótesis. La existencia de un solo cuerpo con una órbita no permitida por el modelo echaría por tierra los postulados en los que se apoya, incluida la existencia del Planeta Nueve.

Es cierto que su modelo logra explicar la existencia de otros objetos con órbitas muy inclinadas con respecto al plano eclíptico. Sin embargo, quedan otras incógnitas por resolver, como la ausencia de objetos transneptunianos con perihelios entre las 50 y las 70 UA. Además, el supuesto Planeta Nueve nunca podría haberse formado tan lejos del Sol, pues esa zona del sistema solar carece de la masa necesaria. Tendría que haber nacido junto a los demás gigantes gaseosos y, después, haber sido eyectado hasta su posición actual. La probabilidad de tal proceso se antoja relativamente baja, al igual que el hecho de que haya sobrevivido sin haber sido expulsado del sistema solar.

De cualquier forma, la única manera de saber si este y otros trabajos similares están en lo cierto será descubrir el tan buscado Planeta X, o Planeta Nueve. La respuesta podría llegar en las próximas décadas, pues ya hay varios grupos que han iniciado su búsqueda. Como siempre, la verdad está ahí fuera... esperándonos.

***Pablo Santos Sanz** es investigador del departamento del sistema solar del Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC).*

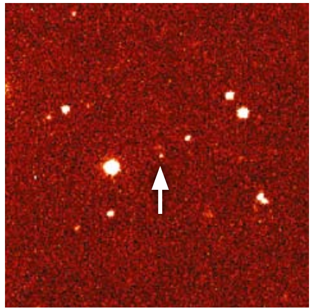
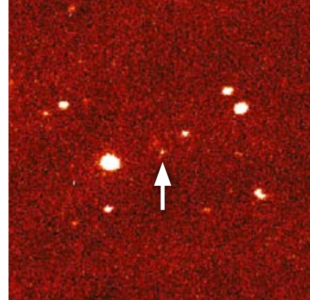
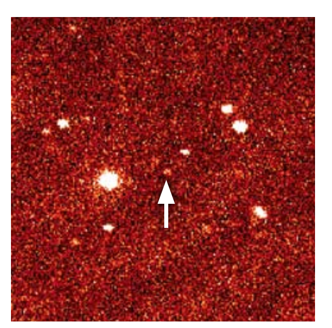
DE: «UNSEEN PLANET MAY LURK NEAR SOLAR SYSTEM'S EDGE», A. WITZE EN *NATURE*, VOL. 529, PÁG. 266, 21 DE ENERO DE 2016;
FUENTE: «EVIDENCE FOR A DISTANT GIANT PLANET IN THE SOLAR SYSTEM», K. BATYGIN Y M. BROWN EN *THE ASTRONOMICAL JOURNAL*, VOL. 151, 20 DE ENERO DE 2016

Viene de la página 21
antes vista. Sedna tarda unos 11.400 años en completar una vuelta al Sol y describe una trayectoria extremadamente oblonga: nunca se acerca a menos de 76 UA del Sol y, en su punto más distante, se aleja 930 UA de la estrella.

«Sedna fue una auténtica sorpresa porque era completamente inexplicable», relata Chad Trujillo, ahora en el Observatorio Gemini de Hawái y otro de sus descubridores. Su órbita se parecía a la de los cometas de período largo. Pero estos, a diferencia de Sedna, tienen un extremo de su órbita firmemente anclado por la gravedad de los planetas gigantes. Sedna no parecía anclado a nada. «A nadie se le había pasado por la cabeza que un objeto así pudiera existir», dice Trujillo. «Nadie podía explicarse cómo acabó allí.»

Durante el decenio siguiente se observaron otros 10 objetos más pequeños con órbitas también alargadas y que nunca se acercaban a Neptuno. Este hecho en sí no era especialmente destacable: ninguno de ellos exhibía características tan extremas como las de Sedna, ni en la forma de la órbita ni en cuánto más allá de Neptuno se situaba su perihelio; es decir, su máximo acercamiento al Sol. Pero todos ellos, y también Sedna, presentaban un argumento del perihelio similar (el parámetro que describe cuánto por encima o por debajo del plano del sistema solar se encuentra un objeto cuando alcanza el perihelio). Y aquello parecía extraño.

La situación se volvió aún más insólita en 2014, cuando Trujillo y Sheppard anunciaron en la revista *Nature* que, tras una década de búsqueda, habían descubierto un segundo objeto parecido a Sedna pero aproximadamente la mitad de grande. «Si uno es biólogo y encuentra una criatura extraña, estará bastante seguro de que tiene que haber más como ella», ejemplifica Trujillo. Lo mismo ocurre en astronomía, continúa, a menos que la primera criatura sea un producto del azar. «Tal vez aquel objeto fuese arrojado casualmente a esa órbita por razones que desconocemos, pero es imposible estar seguro mientras no encuentres otro.»

TRES IMÁGENES tomadas desde el Observatorio de Palomar, en California, a intervalos cercanos a la hora y media, muestran el movimiento de un tenue objeto que los astrónomos denominaron Sedna. Las extrañas órbitas de este y otros cuerpos similares indican que podría haber un planeta oculto mucho más allá de Plutón.

CORTESÍA DE NASA, JPL Y CALTECH

De modo provisional, el nuevo objeto se conoce como 2012 VP_{113}. Su órbita, muy excéntrica y con un período de 4300 años, tiene un perihelio de 80 UA y un afelio (el punto más alejado del Sol) de 446 UA. Al igual que Sedna, 2012 VP_{113} no se encuentra ligado gravitacionalmente a Neptuno. Y, lo más importante, su argumento del perihelio es muy similar al de Sedna, así como al de un puñado de otros KBO. Fue este último dato el que dio lugar a una provocativa afirmación soterrada en medio del artículo de *Nature*: «Esto parece indicar que podría existir un cuerpo perturbador de gran masa en el sistema solar exterior», escribieron Trujillo y Sheppard. Dicho cuerpo, conjeturaron, quizá fuese una supertierra que orbitase a una distancia de hasta 250 UA del Sol. Su gravedad habría influido en los objetos menores y habría sincronizado sus argumentos del perihelio. «No creo que antes hubiese alguien que se tomase en serio la existencia de un gran planeta oculto», comenta Meg Schwamb, astrónoma de Yale. «Pero el artículo de Trujillo y Sheppard puso la idea en circulación.»

Entonces, en septiembre de 2014, dos astrónomos españoles no muy conocidos, los hermanos Raúl y Carlos de la Fuente Marcos, de la Universidad Complutense de Madrid, subieron las apuestas con un artículo publicado en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters*. A partir de las órbitas de Sedna, 2012 VP_{113} y otros objetos más pequeños, argumentaron que podía haber más de una supertierra. Su análisis sugería «fuertemente» la existencia de al menos dos planetas más allá de Plutón. «Según cálculos que no hemos publicado», explica Raúl, «la masa de estos hipotéticos planetas debería ser como mínimo dos veces mayor que la terrestre», aunque probablemente no pase de 15 veces ese valor. Al igual que Sheppard y Trujillo, los hermanos De la Fuente no afirman estar haciendo una predicción en firme; lo único que defienden es que la existencia de una supertierra es verosímil. Pero, si realmente existe, los astrónomos tendrán que revisar buena parte de lo que creían saber acerca del sistema solar .

DUDAS PERSISTENTES

Aunque resulta tentador recurrir a una supertierra para explicar las peculiaridades de Sedna y otros cuerpos semejantes, el Planeta X no es la única opción. Según Hal Levison, experto en formación de planetas del Instituto de Investigación del Sudoeste, en EE.UU., otra posibilidad es que Sedna, 2012 VP_{113} y el resto de los objetos anómalos fueran arrojados a sus órbitas mientras el Sol todavía formaba parte del cúmulo en el que nació, constituido por miles de estrellas que se originaron a partir de una misma nube de gas. Antes de que el cúmulo acabase disgregándose, esas estrellas habrían estado lo suficientemente cerca para perturbar las órbitas de los objetos del sistema solar exterior y enviarlos hacia el interior en trayectorias oblongas y muy extensas. También podría ocurrir, explica Sheppard, que la forma alargada de las órbitas se deba a las fuerzas de marea galácticas (es decir, a una atracción gravitatoria mayor en unas direcciones que en otras) que se producen cuando el Sol, en su órbita alrededor del centro de la Vía Láctea, pasa cerca de las regiones de mayor densidad. «Hemos realizado algunas simulaciones en esta línea y no hemos encontrado nada. Así que no parece una explicación probable, pero hay un montón de posibilidades parecidas», comenta Sheppard.

Cualquiera de esos efectos podría haber colocado los objetos en sus órbitas oblongas. Sin embargo, la hipótesis de la supertierra es la única que explica que los argumentos del perihelio sean tan parecidos. Eso, o una auténtica casualidad. Puede que

los 12 objetos que Sheppard y Trujillo mencionan en su artículo parezcan muchos, pero en el cinturón de Kuiper hay millones de ellos. «Estadísticamente, no es un número que resulte demasiado significativo», reconoce Sheppard.

Los argumentos a favor del Planeta X sugeridos por las órbitas de Sedna y sus compañeros se debilitan aún más si Schwamb y su colaborador Ramon Brasser, del Instituto de Tecnología de Tokio, están en lo cierto. «Un estudio que hemos realizado hace poco muestra que, en realidad, solo hay cuatro objetos como Sedna», explica Schwamb. El resto de los 12 cuerpos, aunque tampoco se acercan demasiado a Neptuno, sí parecen aproximarse lo suficiente para sentir la gravedad del planeta gigante. Por tanto, el Planeta X que haría falta para explicar por qué sus argumentos del perihelio se parecen tanto podría ser el propio Neptuno. Y si 12 objetos no son muy significativos estadísticamente, cuatro lo serán todavía menos. Aunque, en ciencia, «significativo» no quiere decir lo mismo que en la vida cotidiana. «La correspondencia entre los cuatro objetos restantes solo ocurriría por casualidad el 1 por ciento de las veces», señala Brasser. Que la probabilidad sea pequeña, sin embargo, no implica que se pueda cantar victoria. «Que podamos decir que es posible que exista un planeta», apunta Schwamb —y está de acuerdo en que es posible—, «no lo convierte en una realidad».

Los planetólogos han aprendido esa lección en más de una ocasión. En los años ochenta, Richard Muller, físico de la Universidad de California en Berkeley, creyó haber encontrado una explicación para muchas de las extinciones masivas ocurridas en la Tierra: una estrella poco brillante o una enana marrón (un objeto con menos masa que una estrella pero más que un planeta) que orbitase alrededor del Sol a una distancia de unas 100.000 UA, es decir, a unos 1,5 años luz. Según su teoría, una vez cada 26 millones de años, ese objeto, al que llamó Némesis, expulsaría un puñado de cometas de la nube de Oort exterior, una capa esférica y aún hipotética de cuerpos helados que orbitarían mucho más allá de Sedna y de cualquier otro objeto conocido del sistema solar. De esta manera, los cometas de la nube de Oort caerían hacia el Sol y algunos de ellos se estrellarían contra la Tierra, exterminando a una gran parte de las especies.

Pero, al igual que los argumentos actuales a favor del Planeta X, la teoría resultaba verosímil por poco, y todas las búsquedas de Némesis han acabado con las manos vacías. En fecha más reciente, John Matese y Daniel Whitmire, ambos de la Universidad de Luisiana en Lafayette, supusieron la existencia de un planeta del tamaño de Júpiter en los confines del sistema solar exterior para explicar lo que parecía ser un número excesivo de cometas de período largo procedentes de cierta dirección en el cielo. «Era un artículo más de la bibliografía», comenta Schwamb, lo que en boca de un científico viene a ser una manera de decir «nunca llegué a creérmelo». Y, efectivamente, un rastreo de gran sensibilidad realizado con el telescopio infrarrojo WISE, de la NASA, no detectó nada. «Habríamos sido capaces de ver un objeto tan pequeño como Júpiter a una distancia de hasta 30.000 o 40.000 UA del Sol», explica Kevin Luhman, experto de la Universidad estatal de Pensilvania que llevó a cabo la búsqueda. «Y si el objeto hubiera sido tan pequeño como Saturno, tal vez a una distancia de hasta 10.000 o 15.000 UA del Sol.» Sin embargo, los investigadores no encontraron nada. El hipotético Planeta X, una supertierra, estaría mucho más cerca, pero también brillaría mucho menos, por lo que no habría aparecido en ese estudio.

¿ESTÁ ALLÍ O NO?

Con solo 12 objetos atípicos para guiarlos, los expertos no pueden determinar ahora mismo si en el sistema solar hay o no una supertierra. Lo único que cabe afirmar es que la hipótesis resulta compatible con las observaciones. Identificar más objetos con características orbitales similares se antoja crucial, razón por la que los astrónomos están tan entusiasmados con V774104, un nuevo objeto cuyo descubrimiento se anunció el pasado mes de noviembre. Su perihelio está aún más lejos del Sol que el de Sedna. Aún es demasiado pronto para saber si su órbita confirma o rechaza la posibilidad de un planeta gigante desconocido, señala Sheppard, que lideró el equipo responsable del descubrimiento. También es demasiado pronto para decir algo sobre los otros cerca de 40 cuerpos distantes que encontró su equipo al mismo tiempo, en lo que él llama «el estudio más amplio y profundo jamás realizado sobre el sistema solar exterior». Pero, cuanto más descubran los investigadores, más posibilidades tendrán de determinar con seguridad si hay un enorme objeto oculto en el sistema solar.

A la vista de las oportunidades que les ofrecerá, los expertos esperan con impaciencia la puesta en marcha del Gran Telescopio para Estudios Sinópticos (LSST), que empezará a operar en 2018 en el norte de Chile. No será más grande que los mayores telescopios actuales, pero su campo de visión sí será más amplio, lo que le permitirá explorar franjas de cielo mucho más anchas. En la actualidad, apunta Trujillo, se han estudiado unos 10 grados cuadrados del cielo (la luna llena, en comparación, cubre la cuarta parte de un grado cuadrado) en busca de objetos distantes y poco brillantes. El LSST, asegura, «será capaz de explorar decenas de miles».

Si existe una supertierra en el sistema solar, y si es lo suficientemente grande y brillante, el LSST podría encontrarla. O quizá ya lo haya hecho alguien. El pasado mes de diciembre, un grupo afirmó haber obtenido imágenes directas de lo que podría ser otra supertierra con el Gran Conjunto Milimétrico/submilimétrico de Atacama (ALMA), en Chile. La mayoría de la comunidad reaccionó con gran escepticismo, pero eso podría cambiar con más observaciones. O incluso puede que, sin reparar en ello, nuestra supertierra local ya haya sido fotografiada por otro telescopio. «Tal vez esté esperando en el disco duro de alguien que no se percató de que se encontraba allí, simplemente porque no estaba buscándola o porque no lo estaba haciendo de la manera adecuada», dice Trujillo. «Normalmente, solo vemos aquello que estamos buscando.» IyC

PARA SABER MÁS

Planet X. Henry Norris Russell en *Scientific American*, vol. 143, n.º 1, julio de 1930.

A Sedna-like body with a perihelion of 80 astronomical units. Chadwick A. Trujillo y Scott S. Sheppard en *Nature*, vol. 507, págs. 471-474, marzo de 2014.

Extreme trans-neptunian objects and the Kozai mechanism: Signalling the presence of trans-plutonian planets. C. de la Fuente Marcos y R. de la Fuente Marcos en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters*, vol. 443, n.º 1, págs. L59-L63; septiembre de 2014.

Evidence for a distant giant planet in the solar system. Konstantin Batygin y Michael E. Brown en *The Astronomical Journal*, vol. 15, n.º 2, enero de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

El cinturón de Kuiper. Jane X. Luu y David Jewitt en *IyC*, julio de 1996.

El sistema solar más allá de Neptuno. Michael D. Lemonick en *IyC*, enero de 2015.





ANTE UN GRUPO DE MUJERES, una consejera de la ONG Marie Stopes International enseña medidas de planificación familiar, como los anticonceptivos de urgencia, en un hospital de Rabai, Kenia.

SOSTENIBILIDAD

Seis mil millones de africanos

¿Cómo hacer frente al alarmante futuro demográfico de África? La solución: dotar a las mujeres de una mayor autonomía

Robert Engelman

Robert Engelman dirige investigaciones sobre la relación entre la planificación familiar y la sostenibilidad ambiental en el Instituto Worldwatch, del que ha sido presidente. Durante años ha publicado artículos de salud, ciencia y ambiente en la prensa estadounidense.



La Tierra es un lugar finito. Un mayor número de habitantes implica una mayor competencia por los recursos. Pese al progresivo aumento de la población, la evolución demográfica de las últimas décadas ha sido alentadora. A escala mundial, las mujeres actuales dan a luz a una media de 2,5 hijos, la mitad que a comienzos de los años cincuenta. En el 40 por ciento de las naciones del planeta, el índice de fecundidad es igual o menor que el nivel de reemplazo necesario para que los descendientes puedan relevar a sus progenitores, una cifra que corresponde a 2,1 hijos por mujer.

Pero luego está África, donde cada mujer da a luz a un promedio de 4,7 hijos y la población crece a un ritmo casi tres veces superior a la del resto de la humanidad. El continente que vio nacer a nuestra especie afronta un futuro preocupante. La fecundidad (el número de hijos nacidos vivos que concibe una mujer a lo largo de su vida) es elevada en la mayoría de sus 54 países. Los africanos siempre han valorado la familia numerosa como una cuestión de estatus y la consideran una fuente de mano de obra para las labores del campo, aparte de un medio para compensar la elevada mortalidad infantil. Pero hoy sobreviven más bebés que nunca, y estos, a su vez, se convertirán en padres. Más de la mitad de los casi 1200 millones de habitantes del continente son niños y adolescentes, un hecho que derivará en una expansión demográfica nunca vista por la humanidad. Los demógrafos calculan que a finales de siglo la población de África se triplicará o cuadriplicará.

Durante años, los pronósticos dominantes situaban la población africana alrededor de los dos mil millones en 2100. Los modelos suponían que los índices de fecundidad disminuirían de forma rápida y sistemática. En realidad, el decrecimiento ha sido lento y esporádico. Hoy, Naciones Unidas vaticina cifras abrumadoras, que oscilan entre 3000 y 6100 millones de personas. Incluso los cálculos más prudentes de organismos como el Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados, en Austria, ven a África con 2600 millones. En los últimos años, la ONU ha incrementado gradualmente su predicción promedio de la población mundial para 2100 desde 9100 millones en 2004 hasta los actuales 11.200 millones. El crecimiento imprevisto procede en su mayor parte de África.

El aumento desmesurado de la población amenaza el desarrollo y la estabilidad del continente. Muchos de sus habitantes viven en países que carecen de suelos fértiles, recursos hídricos abundantes y Gobiernos competentes. La creciente pugna por los alimentos y los puestos de trabajo podría desatar conflictos y, a su vez, ejercería presión sobre los recursos alimentarios, hídricos y naturales del planeta, especialmente si los africanos abandonan en masa sus países natales, algo que ya está sucediendo. Hasta el 37 por ciento de los adultos jóvenes del África subsahariana afirma querer migrar a otro país debido principalmente a la falta de trabajo.

El continente necesita una nueva estrategia para frenar el crecimiento demográfico, mantener la paz y la seguridad, mejorar el desarrollo económico y preservar la sostenibilidad ambiental. Y el mundo no puede permitirse escatimar tales esfuerzos. Entre 1960 y 1990, las fundaciones y las agencias de ayuda internacionales apremiaron a los Gobiernos africanos para que «hicieran algo» con respecto al fuerte crecimiento poblacional. Básicamente, ese «algo» consistió, por un lado, en una inversión en programas de planificación familiar sin integrarlos en otros servicios sanitarios y, por otro, en proclamas oficiales que afirmaban que, en materia de familia, «cuanto más reducida, mejor». Sin embargo, desde mediados de la década de los noventa la cuestión se silenció. Sacar a relucir el crecimiento de la población como un problema pasó a considerarse una falta de sensibilidad cultural y un asunto políticamente espinoso. Los donantes internacionales cambiaron de ángulo y se volcaron en promover la reforma general de la asistencia sanitaria, con la lucha contra el sida y otras enfermedades mortales como prioridad.

África y el resto del mundo deben reasumir esa sensación de apremio. Debemos vencer el miedo y dar los pasos coordinados que sean necesarios para moderar la actual tendencia demográfica, tanto en África como en cualquier otra región donde se esté

EN SÍNTESIS

Si África no reduce la natalidad, en 2100 su población podría alcanzar entre 3000 y 6100 millones, un valor muy superior a los 1200 millones actuales. El inesperado aumento amenazará los ya frágiles recursos del continente y del resto del planeta.

Las mujeres deben lograr mayor autonomía educativa, económica, social y política para reducir la natalidad. También deben tener un acceso fácil y asequible a los anticonceptivos. Con esa estrategia integrada, Mauricio ha reducido la fecundidad de 6 a 1,5 hijos y Túnez de 7 a 2.

Por su parte, los varones deben dejar de tomar unilateralmente la decisión de tener hijos y poner fin a los abusos contra las mujeres que quieren controlar su maternidad.

Para que las iniciativas den fruto, los líderes políticos han de fomentar el debate público en torno a las medidas para mitigar el crecimiento demográfico.

JONATHAN TORGOVNIK, GETTY IMAGES (*todas las fotografías*)

disparando sin mesura. Los estudios demuestran que, aparte de asegurar el acceso de la mujer a los métodos anticonceptivos y a la información sobre su uso, las mejores medidas son aquellas que ofrecen ventajas adicionales de capital importancia: educar a las mujeres jóvenes y adultas y equiparar su condición social y legal a la de los hombres. Si bien algunos países ya han emprendido iniciativas en esa dirección, resultaría mucho más eficaz integrar las oportunidades de las mujeres en todos los ámbitos: educativo, económico, social y político.

La población nunca podrá ser «controlada», ya que hacerlo implicaría vulnerar derechos humanos fundamentales y probablemente sería fútil. Pero sí es posible influir en ella de un modo indirecto, aunque no por ello menos eficaz. Una serie de estrategias bien planificadas permitiría aliviar la presión sobre los recursos, paliar los conflictos y hacer la vida mucho más plena para niñas y niños y mujeres y hombres por igual.

ÁFRICA: PRESENTE Y FUTURO

Toda una serie de índices confirma que la situación actual del continente ya es desoladora. Pese al progreso económico y los avances democráticos, África destaca hoy por su reducida esperanza de vida, su lento desarrollo y sus elevados índices de pobreza y desnutrición. El rendimiento agrícola se halla entre los más bajos del planeta. Al sur del Sahara, el sobrepastoreo causado por el ganado acelera el avance del desierto y obliga a los pastores nómadas a invadir los terrenos de los agricultores a medida que crece la población de ambos colectivos. Egipto y Etiopía han librado batallas por las aguas del Nilo, antaño compartidas sin fricciones en toda la cuenca del río, que atraviesa once naciones. Un estudio de 2010 reveló que los cuatro países del mundo con los recursos hídricos más «inseguros» se hallan en África.

La competencia por unos recursos cada vez más escasos favorece los conflictos civiles y el terrorismo. En julio de 2014 murieron 80 personas en la isla keniata de Lamu como consecuencia de una disputa entre musulmanes y cristianos por un terreno fértil. Algunos expertos atribuyen en parte el auge del brutal ejército islamista Boko Haram, en Nigeria, al enfrentamiento entre pastores y agricultores por las secas extensiones de matorrales del Sahel. Las escasas perspectivas laborales de los menores de veinte años también inflaman la violencia en África central. «Si hubiera más trabajo, sobre todo en el campo, la frustración no sería tanta y habría menos conflictos en el estado de Plateau», afirma Becky Adda-Dontoh, consejera del Gobierno nigeriano, en alusión a una región del centro-este del país, donde Boko Haram campa a sus anchas.

El Fondo para la Paz, con sede en Washington D.C., cataloga cuatro países africanos —Sudán, Sudán del Sur, Somalia y la República Centroafricana— como los más frágiles del mundo y los menos capaces de gobernar su territorio y de mantener un mínimo nivel de seguridad. Solo en 2015, cientos de africanos se ahogaron en el intento de huir a Europa.

Tratemos ahora de imaginar cómo sería África con dos mil millones de habitantes, por no hablar de seis mil. La historia reciente nos será de ayuda. Asia superó los cuatro mil millones de personas en 2007, pero cuenta con un 50 por ciento más de superficie y, en general, una prosperidad económica notablemente mayor. Así y todo, a pesar de sus recursos, grandes regiones del continente luchan contra el empobrecimiento del suelo agrícola, el descenso de los niveles freáticos, la inseguridad alimentaria y la creciente contaminación atmosférica.

VISIÓN DE CONJUNTO

África condiciona el crecimiento demográfico global

El ritmo de crecimiento de la población africana supera hasta tal punto todos los pronósticos que las Naciones Unidas han aumentado su predicción promedio para la población mundial en 2100, desde 9100 millones hasta los 11.200 millones. Casi todo el crecimiento de más procede de África (*naranja*), cuya población alcanzará, según las previsiones, entre 3000 y 6100 millones a finales de siglo. Pese a que la estimación promedio en Asia (*línea roja gruesa*) para 2100 es aún mayor (4900 millones frente a 4400 en África), para entonces, la población asiática estará menguando, mientras que la africana seguirá en alza.

Si la natalidad en África mantuviera su ritmo actual (*curva naranja delgada*), el continente acabaría albergando 15.800 millones de personas en 2100, más del doble de la población mundial actual. Los demógrafos no esperan que ocurra, pero el pronóstico pone de manifiesto la enorme influencia de la fecundidad en el crecimiento demográfico.

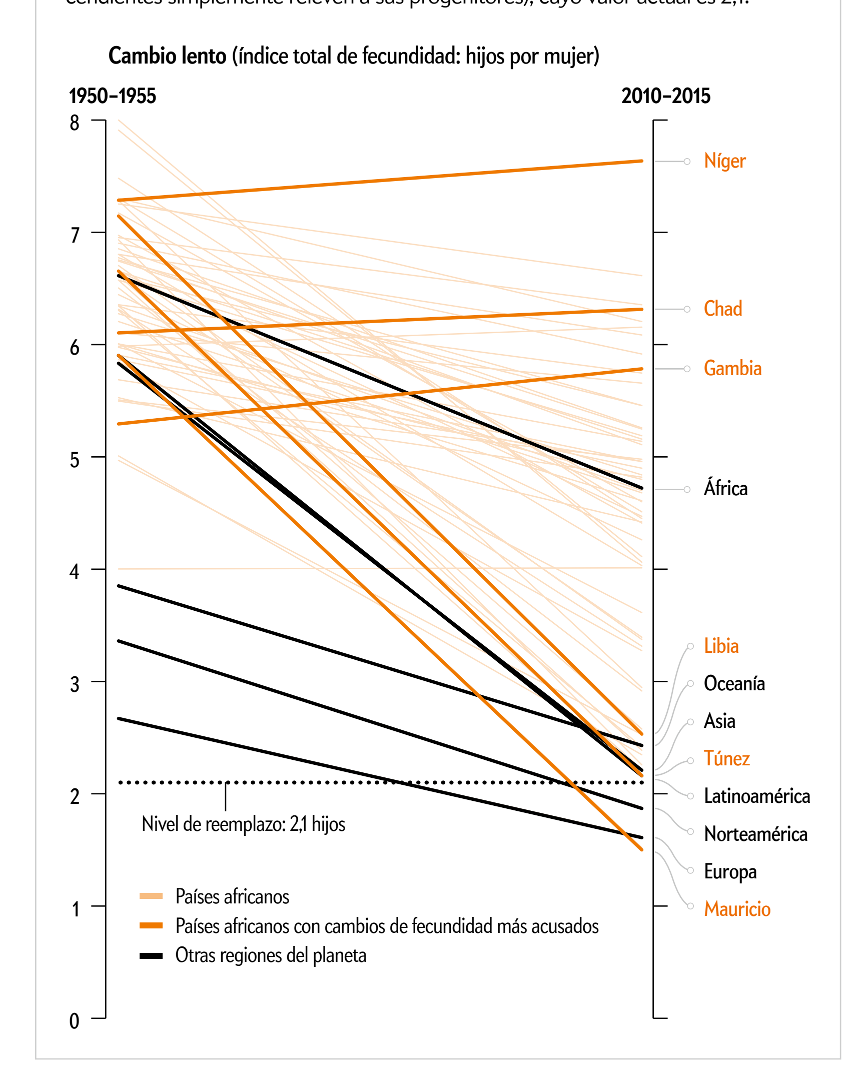
FUENTE: *WORLD POPULATION PROSPECTS: THE 2015 REVISION*. SECCIÓN DE POBLACIÓN, DEPARTAMENTO DE ASUNTOS ECONÓMICOS Y SOCIALES DE LAS NACIONES UNIDAS, 2015. DESCARGADO EL 19 DE NOVIEMBRE DE 2015: HTTP://ESA.UN.ORG/UNPD/WPP/DOWNLOAD/STANDARD/POPULATION; TIFFANY FARRANT-GONZALEZ (*gráfica*)

Uno de los grandes cambios que vivirá África será la proliferación de megalópolis. El continente está inmerso en un rápido proceso de urbanización en el que la mayoría de emigrantes procedentes de regiones agrícolas ahora yermas se asientan en barriadas marginales, donde consiguen el cobijo y la comida que buenamente pueden. En la actualidad, las áreas metropolitanas acogen a casi 500 millones de habitantes; a mediados de siglo albergarán más de 1300, según las predicciones de la ONU. Los demógrafos Jean-Pierre Guengant, del Instituto de Investigación para el Desarrollo, en Francia, y John May, de la Oficina de Referencia Demográfica, en EE.UU., pronostican que el tamaño de las urbes más populosas del continente se habrá disparado hacia 2050: Lagos, en Nigeria, pasará de 11 millones de residentes en 2010 a 40 millones, y Kinshasa, en la República Democrática del Congo, de 8,4 a 31 millones. Una escena de la película *El jardinero fiel*, de 2005, muestra este escenario futuro en sus panorámicas sobre Kiberia en Nairobi, la mayor barriada marginal del continente, que alberga entre medio millón y un millón de almas (nadie conoce la cifra exacta). Las techumbres de metal corrugado de Kiberia se extienden hasta alcanzar casi el horizonte en todas direcciones. Los cálculos multiplican por cientos las aglomeraciones de esas dimensiones hacia mediados de siglo.

EL RETO

Reducir la fecundidad

Si bien el número medio de hijos por mujer en África ha decrecido lentamente desde inicios de la década de los cincuenta, el índice de fecundidad ha disminuido de forma más acusada en las demás regiones del planeta (*líneas negras*). En África se sitúa todavía en 4,7 hijos, mientras que en las otras regiones no supera 2,5. La natalidad en determinados países africanos (*líneas naranjas*) sigue siendo muy alta: 7,6 en Níger, 6,3 en Chad y 5,8 en Gambia. Dichos países podrían seguir el ejemplo de Mauricio, que ha conseguido reducirla de 6 a 1,5, y el de Túnez, donde ha pasado de 6,6 a 2,2. Para estabilizar la población en África y en todo el planeta, la fecundidad media debe situarse en el nivel de reemplazo (el índice necesario para que los descendientes simplemente releven a sus progenitores), cuyo valor actual es 2,1.



La perspectiva de un continente superpoblado, urbanizado y convertido en un hervidero de conflictos ha comenzado a preocupar seriamente a los políticos africanos, en su mayoría viejos partidarios del crecimiento de la población. Las posturas están comenzando a cambiar. En 2012, los entonces primeros ministros de Etiopía y Ruanda hicieron un llamamiento para fomentar la planificación familiar, con objeto de «paliar la pobreza y el hambre, preservar los recursos naturales y adaptarse a las consecuencias del cambio climático y la degradación ambiental». La keniata Musimbi Kanyoro, presidenta del Fondo Global de la Mujer, ha reivindicado recientemente «medios adaptados a la cultura propia y basados en el derecho para frenar el crecimiento demográfico, al tiempo que refuercen la dignidad humana y el progreso sostenible».

No es de extrañar este renovado interés por el acceso a la planificación familiar. Hoy solo un 29 por ciento de las esposas africanas en edad fértil usa anticonceptivos modernos. En el resto del mundo el porcentaje supera el 50 por ciento. Los estudios también ponen de manifiesto que más de un tercio de los embarazos son indeseados; en el África subsahariana, el 58 por ciento de las mujeres de 15 a 49 años que no quieren concebir no usan un método anticonceptivo fiable.

Djenaba, una adolescente que entrevisté hace unos años, dio fe de esa realidad en su remota aldea de Mali, un país donde solo una de cada diez mujeres emplea anticonceptivos. Con quince años recién cumplidos, era ya madre de dos niños. Cuando le pregunté cuántos quería tener, respondió con la mirada gacha: «Tantos como pueda». Pero tras media hora de charla me miró a la cara con los ojos vidriosos y me confesó que ojalá pudiera tomar la píldora para descansar un tiempo y no tardar mucho en dejar de concebir definitivamente.

Si se quiere ganar en prosperidad por fuerza habrá que reducir la natalidad. Pero eso «solo resultará posible si el acceso a los anticonceptivos mejora notablemente desde los bajos porcentajes actuales hasta alrededor de un 60 por ciento hacia 2050», apuntaron Guengant y May en un artículo de 2013. «Lo cual no será nada fácil.»

FUENTE: *WORLD POPULATION PROSPECTS: THE 2015 REVISION*. SECCIÓN DE POBLACIÓN. DEPARTAMENTO DE ASUNTOS ECONÓMICOS Y SOCIALES DE LAS NACIONES UNIDAS. 2015. DESCARGADO EL 19 DE NOVIEMBRE DE 2015: HTTP://ESA.UN.ORG/UNPD/WPP/DOWNLOAD/STANDARD/POPULATION; TIFFANY FARRANT-GONZALEZ (*gráfica*)





LOS ASISTENTES SANITARIOS locales suelen obtener mejores resultados a la hora de cambiar mentalidades. Una trabajadora de Shompole, Kenia, explica a un grupo de madres masái el uso del preservativo (*arriba*). Una asesora de Laniar, Senegal, enseña a usar el dispositivo intrauterino (*derecha*).

PRIMEROS ÉXITOS

Por sí misma, la tendencia hacia la urbanización podría reducir el tamaño de las familias. Criar un niño en la ciudad es más caro y este también tiene menos posibilidades de aportar ingresos a la familia. Por otro lado, puede que los padres adopten una mentalidad más moderna en lo que respecta al tamaño ideal de la familia y al uso de la planificación familiar. Claro está que esta no es la solución definitiva, pero irónicamente ciertos países africanos han conseguido reducir en gran medida sus índices de fecundidad y nos brindan una serie de lecciones. La más importante es el provecho que resulta de combinar el acceso a la planificación familiar con las iniciativas que otorgan a la mujer un mayor control sobre su vida y su familia.

En la región árabe norteafricana, así como en Sudáfrica y en las naciones vecinas, la fecundidad ha disminuido hasta alcanzar valores de tres o menos, cifras cercanas a las del resto del mundo. En cambio, en las tres grandes subregiones (este, centro y oeste de África) los índices oscilan entre cuatro y siete hijos, o incluso más.

La labor comenzó hace unos años. La media docena de estados insulares africanos presenta uno de los tamaños familiares más reducidos del continente. Uno de los descensos de fecundidad más acelerados de la historia tuvo lugar en Mauricio, al este de Madagascar. La media descendió desde más de 6 en la década de los sesenta hasta 2,3 hace veinte años. Y hoy se sitúa en 1,5, comparable a la de Europa o Japón. La caída más acusada tuvo lugar en los años sesenta e inicios de los setenta, con la parálisis del crecimiento económico. Los mauricianos recibían una educación relativamente buena, tanto mujeres como hombres. Y al inicio de los sesenta, el Gobierno logró vencer las reticencias de varios colectivos, tanto católicos como musulmanes, al fomento de la planificación familiar. En solo dos décadas, cuatro de cada cinco mujeres en edad fértil empleaban métodos anticonceptivos.

El primer presidente de Túnez, Habib Bourguiba, puso en marcha en 1957 una serie de medidas que supusieron un cambio radical en el estatus legal y en la salud reproductora de las tunecinas; una transformación difícil de imaginar en un país musulmán. Bourguiba les garantizó plenos derechos de ciudadanía, entre ellos el derecho a votar y a prescindir del velo. Se comprometió a implantar la educación primaria universal para niñas y niños, prohibió la poligamia, elevó la edad mínima para contraer matrimonio y concedió a la esposa el derecho al divorcio. Legalizó los anticonceptivos y subvencionó el aborto a las madres de familia numerosa. Hacia mediados de los años sesenta, las clínicas ambulantes de planificación familiar ofrecían anticonceptivos orales en todo el país. Bourguiba no era demócrata —la Asamblea Nacional, a la cual controlaba con mano de hierro, lo eligió presidente vitalicio en 1975—, pero sus reformas sociales se mantuvieron tras su derrocamiento en 1987. La fecundidad de las tunecinas descendió de siete a dos hijos a comienzos del presente siglo (desde entonces ha aumentado levemente). Otros ejemplos menos dramáticos y más recientes de iniciativas presidenciales también han contribuido a moderar la natalidad en Kenia, Gana y Sudáfrica.

Los ejemplos de Mauricio y Túnez demuestran que la clave para recortar el tamaño de la familia reside en mejorar la calidad de vida de las mujeres equiparando sus posibilidades económicas y sus derechos legales a los de los hombres. A pesar de las opiniones contrarias, el crecimiento económico por sí mismo no conlleva una reducción notable de la fecundidad.

UNA ESTRATEGIA INTEGRADA

¿Cómo puede el resto de África hacerse eco de ese éxito? El primer paso consiste en reconocer que es la mujer y su pareja, y no el Gobierno, quienes tienen el derecho a decidir el número de hijos. La mujer que es vista como igual al hombre por su Gobierno y por la gente que la rodea tiene más probabilidades de concluir que es ella quien debe decidir ser madre y en qué momento, un poder de decisión que deriva en una familia menos numerosa.

La educación, sobre todo la secundaria, cataliza la adquisición de una mayor autonomía. Gracias a ella, las niñas y las jóvenes adquieren conocimientos de nutrición, medicina y vacunas. Pero también abre las puertas a un mundo de oportunidades económicas, sociales, cívicas, políticas y artísticas. Impulsa a las jóvenes a buscar anticonceptivos y planear familias más pequeñas mientras aprenden sobre la realidad del mundo, su cuerpo y el potencial para dirigir su vida. Según el Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados, las mujeres africanas sin educación tienen un promedio de 5,4 hijos. Las que han acabado la enseñanza primaria tienen una media de 4,3 niños. Y haber cursado la secundaria comporta una acusada caída de la fecundidad, que sitúa el índice en 2,7. En el caso de las universitarias desciende aún más, hasta 2,2.

También es fundamental mejorar la educación de los jóvenes varones. Los adolescentes de ambos sexos que asisten a cursos de educación sexual tienden a retrasar las relaciones sexuales, lo que reduce el número de embarazos precoces e indeseados. La pandemia del sida disparó la difusión de la educación sexual, al menos en África meridional y oriental. Pero su calidad no es siempre la deseable y continúa sin existir en buena parte del continente.

Con todo, la influencia de la educación sexual y la prolongación de los estudios puede caer en saco roto si la planificación familiar no recibe el apoyo de los Gobiernos y del grueso de la sociedad. Por licenciada que se sea, una no puede fabricar los anticonceptivos en casa.

Parece que los políticos africanos comienzan a reconocer la urgencia de la situación. El presidente de Uganda, Yoweri Museveni, se oponía abiertamente a las medidas de planificación familiar, hasta que en julio de 2014 acogió un congreso panafricano que trató la necesidad de mejorar el acceso a ellas. La creación de sendos programas de cupones sufragados por los Gobiernos de Kenia y Uganda y la subvención de la asistencia sanitaria materno-infantil en Zimbabue incentivan a individuos y parejas a visitar las clínicas. Muchos salen de ellas con un método anticonceptivo que evitará embarazos indeseados y ampliará el intervalo entre los deseados. En Malawi, un programa experimental de transferencia de dinero a niñas en edad escolar y a sus padres o tutores ha promovido la asistencia a la escuela. Con ello, no solo se consigue mejorar el nivel educativo; también se retrasa la actividad sexual y el matrimonio, al tiempo que se reducen los embarazos en la adolescencia.

El Gobierno etíope ha reclutado hace poco a 38.000 promotores de divulgación sanitaria. Tras hacerles entrega de la información y demás material, los ha enviado a las zonas rurales, donde reside el 80 por ciento de la población. El personal sanitario, que accede a las aldeas remotas en bicicletas donadas por EE.UU., informa a las mujeres sobre la planificación familiar y los anticonceptivos; también a sus maridos, si no se muestran reacios. La fecundidad ha disminuido durante los últimos tres años de 4,8 a 4,1. En otras comunidades de Kenia y Gana, y hasta en la megalópolis de Kinshasa, se observan declives igualmente notorios.



LAS VISITAS A DOMICILIO, aquí apoyadas por la Fundación William y Flora Hewlett, son fundamentales para que la información sobre planificación familiar llegue hasta aldeas recónditas como Mbale, en Uganda.

Por desgracia, en muchos otros lugares la postura política es desalentadora. Los presidentes del continente, mayoritariamente varones, parecen seguir pensando que las mujeres no deberían gozar de igualdad. «Serviría de ayuda que los presidentes visitaran clínicas de planificación familiar. Eso podría influir en las actitudes. Pero, en lugar de ello, optan por los centros de vacunación», reprocha May.

CAMBIAR LA ACTITUD DE LOS HOMBRES

Así las cosas, buena parte de la vida de la mujer depende del varón. Y puesto que son tantos los maridos que creen que las decisiones relativas a la concepción son solo cosa suya, una de las medidas más eficaces para controlar el número de embarazos consiste en ayudar a la mujer a planificar su maternidad a hurtadillas, por ejemplo, con inyecciones anticonceptivas. Los hombres, además, tienden a querer entre uno y tres hijos más que las mujeres, algo que no sorprende a la vista de quién soporta el embarazo y el parto y se ocupa de la mayor parte de los cuidados infantiles.

Las diferencias de parecer entre uno y otro sexo se llegan a manifestar de modos reprobables. El hecho de que la mujer utilice anticonceptivos o siquiera demuestre interés por ellos puede hacerla blanco de abusos por su pareja. Un estudio nigeriano presentado ante un congreso en 2011 reveló que el 30 por ciento de las mujeres casadas o separadas declara haber sufrido cierto grado de «violencia conyugal», de carácter sexual, físico o psicológico. Las usuarias de anticonceptivos y las que han cursado la educación primaria son más propensas que las no usuarias y las no escolarizadas a sufrir ese tipo de abusos. Incluso en Ruanda, país decidido a conceder más autonomía a la mujer, el 31 por ciento de las mujeres declaró en 2010 haber sido víctima de violencia por parte de su marido o pareja.

La violencia no fue el problema que afectó a Faridah Nalubega, de 26 años. Según PAI, un grupo activista defensor de la planificación familiar radicado en EE.UU., su intención era tener solo dos o tres hijos, el máximo que pensó podía permitirse como vendedora de pescado frito en la capital de Uganda, Kampala. Pero acabó siendo madre de seis, en buena parte, según confesó

a PAI, porque su marido le prohibió usar anticonceptivos y su clínica de planificación familiar no le ofreció otra alternativa.

Pero las actitudes podrían estar cambiando. Los hombres que he entrevistado en mis viajes por África recordaban con nostalgia los días en que había menos gente y más bosques, hasta llegaban defender la planificación familiar como medio para frenar unas tendencias tan sombrías. Algunos también mostraban respeto por sus compañeras de trabajo. «Las mujeres del consejo ven las cosas desde ángulos distintos y aportan ideas que a los demás no se nos habrían ocurrido», me comentó un miembro de un ayuntamiento de Tanzania. «No querríamos perderlas.» Su afirmación refleja una verdad más profunda: la fecundidad puede reducirse mediante lo que los sociólogos denominan un «cambio de ideas», es decir, la creciente aceptación de conceptos otrora considerados radicales o incluso aberrantes. Tanzania, por ejemplo, contempla un proyecto de constitución que otorgaría a la mujer el mismo estatus del que goza el hombre en materia de propiedad de bienes, sucesión y otros derechos legales.

Por otra parte, las mujeres están comenzando a ocupar cargos en los Gobiernos como nunca antes se había visto. Hoy, Ruanda cuenta con una ministra de género y un parlamento con la proporción más elevada de mujeres del mundo: casi dos tercios. Joyce Banda ocupó la presidencia de Malawi entre 2012 y 2014. Ellen Johnson Sirleaf es la actual dirigente de Liberia. Ngozi Okonjo-Iweala fue ministra de exteriores y de finanzas en Nigeria, la primera mujer en ostentar cualquiera de los dos cargos. Nkosazana Dlamini Zuma, sudafricana, es la presidenta de la Comisión de la Unión Africana. Cuando las adolescentes contemplan a mujeres ocupando tales puestos, cambian de opinión respecto a sus propias posibilidades.

PRESIONAR SIN GENERAR RECHAZO

Níger, en África occidental, constituye un ejemplo de las razones por las que es básica la adopción de una estrategia integrada para frenar el crecimiento demográfico con el concurso del Gobierno. Allí, en una de las naciones más pobres del mundo, la fecundidad promedio alcanza 7,5 niños por mujer y apenas se ha reducido desde que en 1950 comenzara a calcularse el índice. Mujeres y hombres opinan que la familia ideal es aún más grande.

Aunque los demógrafos no acaban de saber por qué, esa elevada cifra obedece probablemente a una combinación de factores. Entre ellos figuran las creencias religiosas, la alta mortalidad infantil, la gran proporción de población rural que depende de los niños para trabajar una tierra pobre, la valoración de las familias multitudinarias por una mera cuestión de posición social (especialmente por parte de los hombres) y el bajo estatus de la mujer (los hijos refuerzan el valor de la madre en los matrimonios, que a menudo son polígamos). El demógrafo John Casterline, de la Universidad de Ohio, señala que en las familias numerosas se suele compartir el cuidado de los niños, lo que reduce la carga y, por tanto, facilita la decisión de tener otro hijo. Mamadou Tandja, presidente de Níger hasta 2010, solía extender los brazos para plasmar en su gesto la gran extensión de su país, mayor que Francia, y hacer ver al visitante que hay espacio de sobra para acoger más población.

Según Guengant, que ha trabajado en el oeste de África y en otras regiones del continente, una estrategia múltiple requiere el firme compromiso del Gobierno, la implicación de la población y dinero. Pero afirma que a menudo las promesas de los Gobiernos no se llegan a cumplir. En un congreso internacional celebrado en 2012 en Londres, un alto cargo del ministerio de sanidad de Gana aseguró al público que el programa de seguridad social de su país reembolsaría los gastos personales invertidos en planificación familiar. Tres años más tarde, todavía estudian cómo hacer efectivo ese reembolso. La implementación por parte de la mayoría de los Gobiernos «es un desastre», advierte el demógrafo. «Ha de haber presión del Gobierno, de la ciudadanía o de ambos. Y en África no existe.»

«Presión» es una palabra delicada entre los que desconfían del control demográfico. Pero a excepción de China, donde la nueva política de dos hijos limita aún la libertad de reproducción, ninguna nación acota el tamaño de la familia. Guengant se refiere realmente a presionar a los líderes políticos para que den un paso adelante y abran un debate público sobre las medidas para frenar el crecimiento demográfico. El problema exige adoptar un enfoque zen, esto es, hallar un medio de moderar el crecimiento creando las condiciones propicias para que el fin perseguido se alcance de forma natural, sin buscar el enfrentamiento directo.

Las culturas y las actitudes pueden evolucionar, a menudo rápidamente, como demuestran los índices de fecundidad en Túnez y Mauricio. Por desgracia, no sé qué fue de Djenaba, en Mali, ni de sus esperanzas de decidir el número de hijos que deseaba tener. Pero sus palabras nos recuerdan la gran importancia de las iniciativas destinadas a dotar a la mujer de los medios y del apoyo social necesario para prevenir los embarazos indeseados consumados por coerción o presión. Tales iniciativas constituyen la única vía ética y factible para que la población africana frene su crecimiento y deje de crecer, como deberían hacer todas las demás. Solo así, tanto en África como en el resto del mundo, podremos gozar de una vida próspera, segura y en armonía con el ambiente.

Conceder autonomía a la mujer no necesita una justificación demográfica. Pero sucede que la mujer que puede aspirar alto y decidir sobre su vida también decide tener menos hijos y concebirlos más tarde, y lo logra. Aun si no importara el crecimiento de su población, el futuro de África y del mundo sería más halagüeño si cada niña y mujer recibiera una buena educación, gozara de buena salud y tuviera la libertad para alcanzar sus sueños; de modo que pudiera concebir un hijo cuando y con quien ella escogiera, sin temor a ninguna coacción o represión masculina.

Que África termine el siglo con varios miles de millones de habitantes o con una cifra cercana a los actuales 1200 millones condicionará notablemente su desarrollo, prosperidad y resistencia ante unos retos que son ineludibles.

PARA SABER MÁS

Africa's demographic challenges: How a young population can make development possible. Lilli Sippel et al. Instituto de Población y Desarrollo de Berlín, 2011. **www.berlin-institut.org/fileadmin/user_upload/Afrika/Africas_demographic_challenges.pdf**

African demography. Jean-Pierre Guengant y John F. May en *Global Journal of Emerging Market Economies*, vol. 5, n.º 3, págs. 215-267, septiembre de 2013.

Unmet need and fertility decline: A comparative perspective on prospects in Sub-Saharan Africa. John B. Casterline y Laila O. El-Zeini en *Studies in Family Planning*, vol. 45, n.º 2, págs. 227-245, junio de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Caída de la natalidad en el Tercer Mundo. Bryant Robey, Shea O. Rutstein y Leo Morris en *IyC*, febrero de 1994.

Población, pobreza y entorno local. Partha S. Dasgupta en *IyC*, abril de 1995.

Tendencias demográficas. Joel E. Cohen en *IyC*, noviembre de 2005.

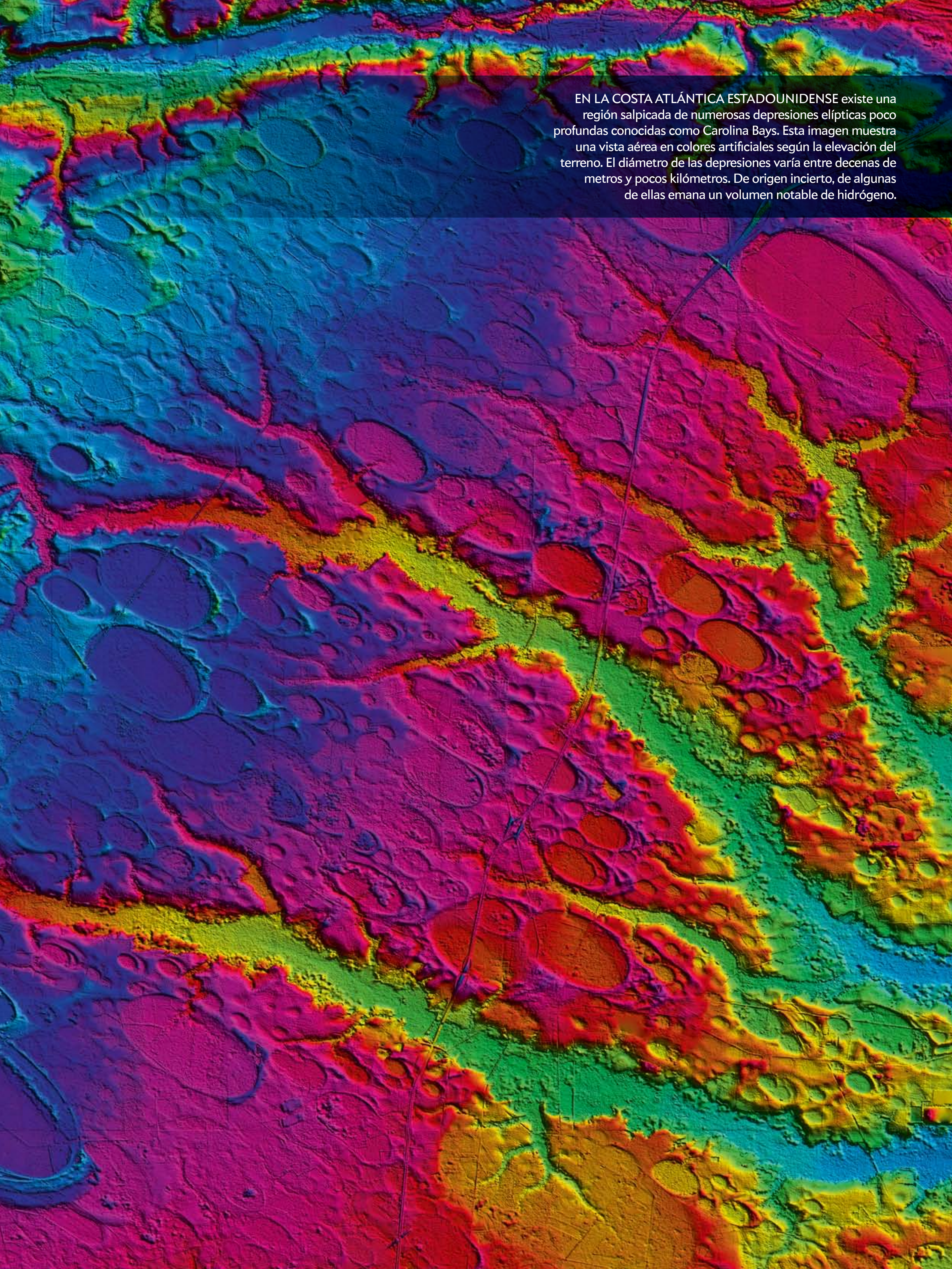


ENERGÍA

FUENTES NATURALES DE HIDRÓGENO

Se han descubierto abundantes emisiones de hidrógeno en diversos puntos continentales. ¿Se avecina una revolución energética?

Alain Prinzhofer y Éric Deville



EN LA COSTA ATLÁNTICA ESTADOUNIDENSE existe una región salpicada de numerosas depresiones elípticas poco profundas conocidas como Carolina Bays. Esta imagen muestra una vista aérea en colores artificiales según la elevación del terreno. El diámetro de las depresiones varía entre decenas de metros y pocos kilómetros. De origen incierto, de algunas de ellas emana un volumen notable de hidrógeno.



Alain Prinzhofer es director científico de la consultora GEO4U de Brasil y profesor asociado en el Instituto de Física del Globo y en el Laboratorio Interdisciplinar de Energías del Mañana, ambos en París.

Éric Deville es geólogo del Instituto Francés del Petróleo y las Nuevas Energías y profesor en la escuela de posgrado que la institución tiene en Rueil-Malmaison.

Hace poco más de dos años, un comunicado de prensa del antiguo Instituto Francés del Petróleo, ahora IFP Nuevas Energías, causó cierto revuelo mediático en el mundo de la divulgación científica: se había descubierto que el hidrógeno no se emite únicamente en determinadas cadenas montañosas y en el fondo de los océanos —como ya se sabía desde la década de los setenta gracias a los estudios del Instituto Francés de Investigación para la Explotación del Mar—, sino también en medio de los continentes. Además, se habían hallado yacimientos de este gas combustible de forma casual, sin haberlos buscado, por lo que la búsqueda intencionada de otros yacimientos se vislumbraba como una apuesta prometedora. De hecho, nuestras investigaciones en colaboración con un equipo ruso indican que los continentes podrían estar plagados de puntos donde el hidrógeno escapa del suelo.

¿Hidrógeno gaseoso que abunda en la Tierra sin haberlo fabricado? De ser así, podría producirse una conmoción en el sector energético. No todos los días se da a conocer una nueva fuente de energía, y un descubrimiento de esa índole pone en un aprieto a quienes toman las decisiones. Emprender grandes programas de investigación y desarrollo sobre una cuestión inexplorada, como es el caso del hidrógeno natural, conlleva un riesgo: el éxito no está asegurado (aunque, si conociéramos de antemano el resultado final de un programa de investigación antes de lanzarlo, la investigación no existiría). Por otra parte, tras casi dos siglos dependiendo de los combustibles fósiles (carbón y petróleo), considerar nuevas estructuras técnicas y sociales para integrar en ellas el hidrógeno natural supone todo un reto. Es más fácil explotar otras fuentes de energía, como la solar o la eólica, empleando la tecnología actual, como paneles fotovoltaicos y aerogeneradores.

El hidrógeno al que aquí se hace referencia es el compuesto gaseoso H_2, más correctamente denominado dihidrógeno, cuyas moléculas se componen de dos átomos de hidrógeno, el elemento más abundante del universo. Con el descubrimiento de yacimientos de hidrógeno, ¿cabe esperar un mejor futuro energético para la humanidad? En el presente artículo trataremos de examinar la cuestión. Pero debe tenerse en cuenta que, si no nos comprometemos a investigar con el fin de ampliar nuestros conocimientos, el hidrógeno no gozará nunca de la oportunidad de convertirse en una fuente de energía significativa.

En primer lugar, debe señalarse que el mercado actual del hidrógeno industrial es más importante de lo que imaginamos: su facturación supera los 100.000 millones de dólares al año en todo el mundo. El volumen de hidrógeno que consumimos, principalmente en las refinerías y en la industria del amoniaco, equivale aproximadamente al 22 por ciento del consumo de «gas natural» (término con que se designa, de forma simplificada y abusiva, el metano extraído del subsuelo).

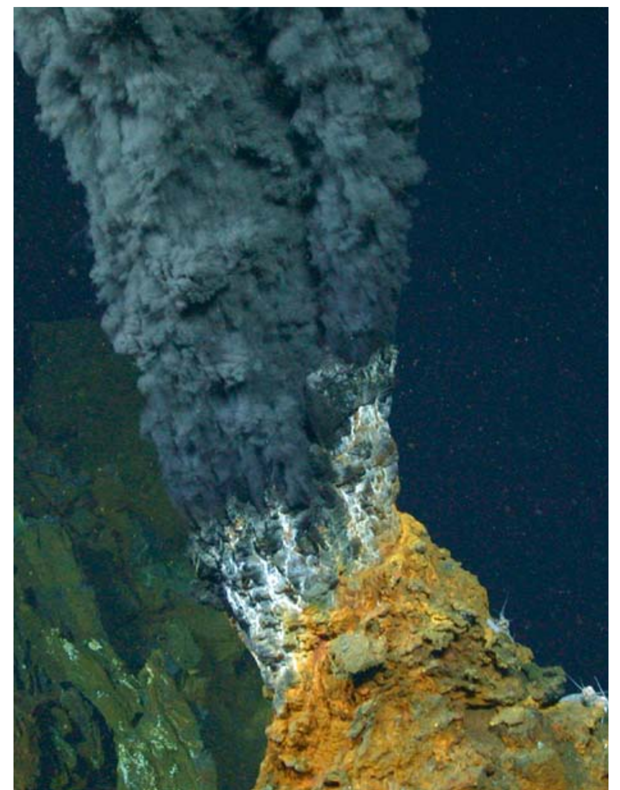
Sin embargo, todo ese hidrógeno está fabricado. El 94 por ciento se obtiene a partir de combustibles fósiles (metano, petróleo, carbón), y el resto, por hidrólisis. Su producción supone un elevado coste, tanto económico como ambiental: para la misma cantidad de energía, el coste del hidrógeno es unas cinco veces superior al del petróleo; por otro lado, se liberan diez kilogramos de dióxido de carbono por cada kilogramo de hidrógeno producido. Además, el rendimiento energético de su generación es

EN SÍNTESIS

El hidrógeno usado en la actualidad con fines energéticos debe producirse con anterioridad a partir de hidrocarburos o por electrólisis del agua, por lo que no constituye una fuente de energía.

Durante los últimos años se han descubierto emisiones de hidrógeno natural en varias regiones continentales. Tales zonas, que presentan flujos considerables de gas, podrían abundar en el planeta.

A diferencia de las fuentes oceánicas, el hidrógeno continental podría aprovecharse con facilidad. Con todo, aún es necesario realizar más estudios para evaluar su posible explotación industrial.



EL OCÉANO es rico en fuentes de hidrógeno natural. Este gas abunda en las emisiones de algunos respiraderos hidrotermales, como el que muestra la imagen, situado en el Caribe. Sin embargo, la profundidad, las elevadas temperaturas y el medio corrosivo imposibilitan su explotación.

EN EL NOROESTE DE FRANCIA se han encontrado emisiones de hidrógeno asociadas a fallas (*a*). Un estudio realizado en la falla de Granville (*b y c, según el corte AA'*) ha revelado que la estructura libera hidrógeno por los bordes del filón de cuarzo de casi 50 metros de espesor que la cementa. Los mayores flujos se presentan en el borde suroriental, probablemente debido a una mayor fracturación del cuarzo en contacto con los metasedimentos precámbricos.



EN RUSIA se han hallado emanaciones de hidrógeno vinculadas a depresiones circulares del terreno. Esta imagen tomada por satélite muestra las formaciones existentes en la región de Borissoglebsk, a unos 600 kilómetros al sur de Moscú.

inferior al de la combustión directa de los hidrocarburos fósiles que se emplean en fabricarlo.

Hoy en día, por tanto, los vehículos propulsados por hidrógeno contaminan y consumen más que los que utilizan combustibles ordinarios basados en hidrocarburos. Por esa razón, hace ya decenios que el hidrógeno como carburante es un sueño por desarrollar, aunque Toyota acabe de lanzar el primer modelo comercial de automóvil movido por hidrógeno.

Existen dos motivos por los que la situación podría cambiar en un futuro cercano. Por un lado, el aumento de la producción fotovoltaica y eólica requiere que se almacene parte de la energía eléctrica generada, ya que se trata de fuentes intermitentes. Y, aunque no sabemos cómo almacenar grandes cantidades de electricidad, podemos convertir fácilmente la electricidad en hidrógeno mediante la electrólisis. La transformación inversa, la producción de electricidad a partir de hidrógeno, tampoco supone mayor problema gracias a las pilas de combustible (¡inventadas en 1842!). Por tanto, se piensa en aprovechar esa equivalencia entre electricidad e hidrógeno para cubrir la demanda energética con la misma flexibilidad que permiten los combustibles fósiles y sin depender de la buena voluntad del sol o del viento.

Por otro lado, hoy en día no cabe considerar el hidrógeno simplemente como un vector energético (una forma aprovechable de energía generada por el ser humano a partir de otra fuente), sino también como una fuente de energía producida directamente por la naturaleza. Ahí reside el quid de la cuestión en lo que respecta al hidrógeno natural que, como veremos, nuestro planeta produce en grandes cantidades y en numerosos sitios.

YACIMIENTOS REPARTIDOS

Esta nueva fuente de energía podría transformar la estructura de nuestras sociedades, basadas desde la Revolución Industrial en las reservas de combustibles fósiles. La explotación del petróleo, los gases de hidrocarburos o el carbón se encuentra centralizada, ya que solo es posible la extracción de dichos recursos en un número limitado de lugares distribuidos irregularmente en la superficie del globo. Por el contrario, el hidrógeno natural parece estar mucho mejor repartido. Además, tal y como se plantea hoy su explotación, podría extraerse realizando perforaciones poco profundas (mucho más como un pozo de agua que como un pozo petrolífero). Puede usarse tal cual, sin necesidad de refinarlo, y su consumo no contamina, ya que su combustión (según la reacción $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$) solo produce agua.

¿Qué sabemos del hidrógeno natural? Se han hallado emisiones subterráneas de este gas desde al menos la década de los setenta. Pero se trataba más bien de curiosidades geológicas: o bien las emisiones se localizaban en el océano, en respiraderos hidrotermales de las dorsales oceánicas (bajo miles de metros de agua y en ambientes hostiles y corrosivos),

o bien sus flujos eran demasiado débiles para pensar en un aprovechamiento industrial.

Una serie de estudios recientes, todavía modestos, revelan que la Tierra emite hidrógeno en cantidades mucho mayores de lo que se creía y en lugares muy accesibles del interior de los continentes. Desde el punto de vista geológico se distinguen dos tipos de yacimientos: los que se hallan en formaciones ofiolíticas (fragmentos de litosfera oceánica atrapados en las cadenas montañosas de las zonas de subducción, donde una placa litosférica se hunde bajo otra) y los ubicados en regiones cratónicas, es decir, en el corazón de los antiguos continentes.

Se ha estudiado mucho el hidrógeno que se emite en las dorsales oceánicas y en las formaciones ofiolíticas, y se conocen bastante bien los mecanismos de su génesis. Sin embargo, el conocimiento y la exploración del hidrógeno continental, aunque su flujo y volumen parecen mayores, se encuentran todavía en fase preliminar.

La situación es análoga a la de petróleo: si bien lleva utilizándose comercialmente desde mediados del siglo XIX, los primeros estudios científicos coherentes sobre su origen tan solo datan de 1930. Por tanto, no resulta descabellado imaginar a la humanidad captando y aprovechando el hidrógeno natural aunque los mecanismos de su génesis y su migración en el subsuelo no se conozcan del todo.

UN ORIGEN GEOLÓGICO TODAVÍA INCIERTO

Dos razones han motivado la investigación científica del hidrógeno oceánico y ofiolítico. Por un lado, la necesidad de comprender los procesos geoquímicos que lo originan y que forman parte de la dinámica de la Tierra, entendiendo esta como un gran reactor químico activado por movimientos de convección (el ascenso por empuje hidrostático de material caliente y el descenso de material frío). Por otro, este hidrógeno es considerado una de las piezas clave en el origen y la evolución incipiente de la vida en la Tierra. Hoy sabemos que, antes de la aparición de la fotosíntesis —y, por tanto, del uso de la energía solar por los organismos—, la única fuente de energía con que contaban los seres vivos era el hidrógeno.

¿Cuál es el origen del hidrógeno oceánico y ofiolítico? Según la teoría más aceptada, procede de la alteración de las rocas de las que se compone principalmente la litosfera oceánica: las peridotitas. Su mineral mayoritario es el olivino, que contiene hierro ferroso (iones Fe^{2+}). El olivino se altera fácilmente al interaccionar con el agua caliente asociada a la actividad hidrotermal de las dorsales oceánicas o al mero aumento de la temperatura con la profundidad. El hierro ferroso se disuelve entonces en el agua y se produce una reacción de reducción-oxidación: el hierro ferroso se oxida a hierro férrico (Fe^{3+}), mientras que el agua se reduce y da lugar a hidrógeno molecular. Se trata de una reacción bien conocida, denominada serpentinización, que puede responder tanto a procesos químicos si las temperaturas

YACIMIENTOS CONTINENTALES

Un recurso disperso por el globo

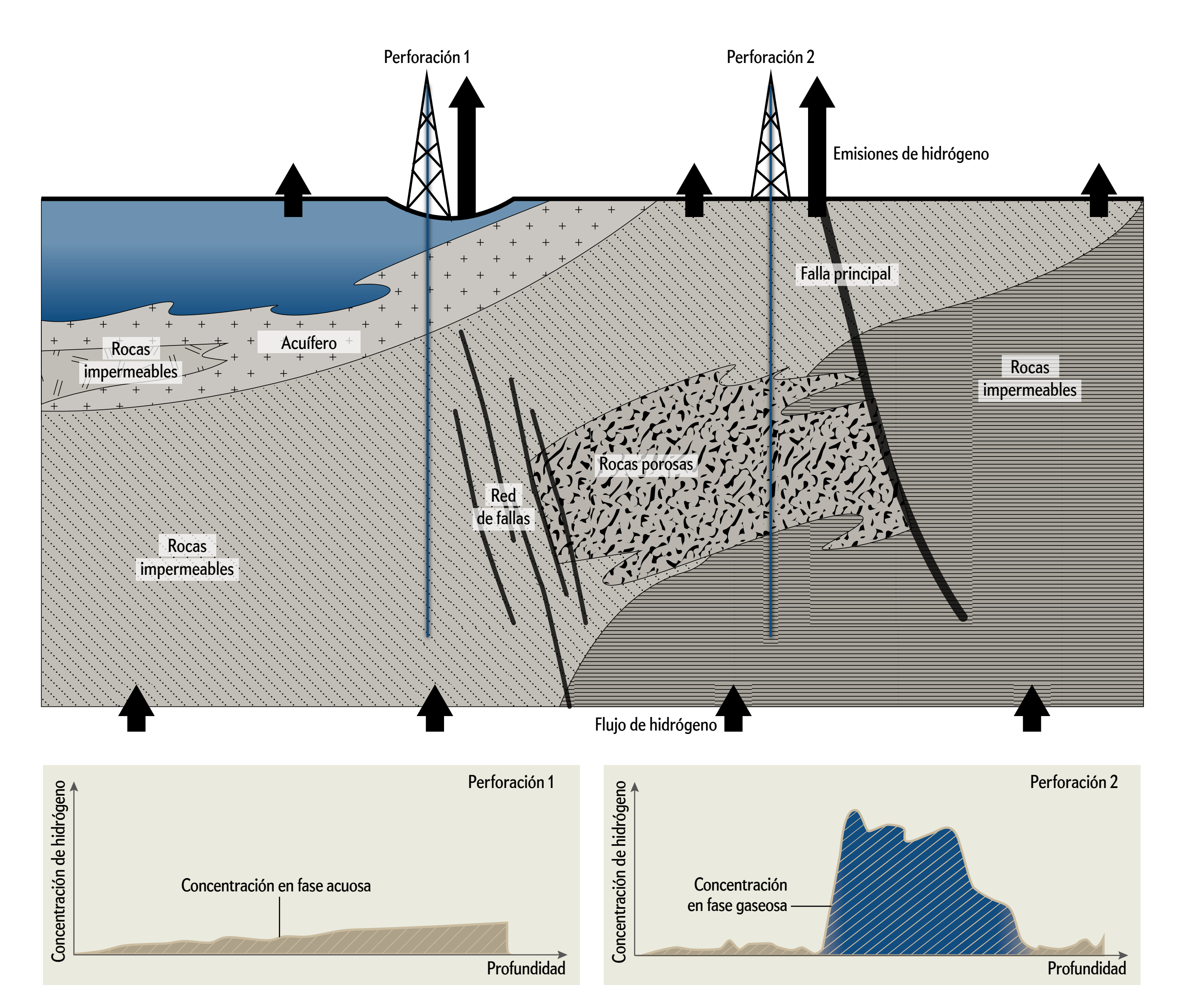
A lo largo de las últimas décadas se han descubierto esporádicamente emisiones gaseosas ricas en hidrógeno. Se hallaron, por ejemplo, en el este de Kansas en la década de los setenta, en la península de Kola (al noroeste de Rusia) y en el cráter de impacto meteorítico de Siljan, en Suecia, en la década de los ochenta. Entre otros lugares, también se descubrieron emisiones en minas de carbón en Sudáfrica y en el centro de Mali, un yacimiento que alimenta desde hace dos años un pequeño generador eléctrico y que es objeto de un proyecto de explotación.

Sin embargo, los grandes flujos de hidrógeno procedentes de la corteza continental no se detectarían hasta mucho más tarde. Los primeros se hallaron en 2005 en Rusia. El geólogo Nikolay Larin y su padre, Vladimir, descubrieron que manaba hidrógeno de una depresión casi circular situada en el cratón europeo, una región muy antigua y estable de la corteza continental.

Desde entonces, Larin y sus colaboradores han estudiado decenas de las miles de depresiones similares que existen entre la región de Moscú y Kazajistán. En todos los casos han hallado emisiones de hidrógeno en cantidades significativas. Tras los primeros descubrimientos del equipo ruso, con el que empezamos a colaborar en 2010, emprendimos la tarea de localizar mediante imágenes de Google Earth depresiones similares en otras zonas del planeta con el fin de analizar sus flujos de hidrógeno.

En colaboración con Kathleen Farell, del Servicio Geológico de Carolina del Norte, hemos estudiado algunas de las incontables depresiones elípticas conocidas como Carolina Bays y hemos obtenido resultados similares a los observados en el caso de las depresiones rusas. Existen muchas otras regiones que exhiben depresiones con la misma morfología, pero todavía queda pendiente su estudio para determinar cuáles están relacionadas con emisiones de hidrógeno y cuáles son el resultado de otros fenómenos geológicos (dolinas formadas por disolución de caliza o de evaporitas poco profundas, deslizamientos de tierra debidos a la fusión de una lente de hielo en el permafrost, etcétera).

Por último, cabe señalar que las emisiones de hidrógeno no se limitan únicamente a las depresiones circulares. También se pueden dar en las fracturas de rocas superficiales muy duras, como demuestran las emisiones de Kansas o las descubiertas recientemente en el oeste de Francia.



EL HIDRÓGENO DEL SUBSUELO puede ascender a la superficie de varias maneras. Este esquema muestra dos casos. En la perforación 1 (*izquierda*), el hidrógeno permanece disuelto en el agua subterránea y migra únicamente por difusión en el medio acuoso; las concentraciones se mantienen siempre bajas y disminuyen en las zonas más superficiales (*abajo a la izquierda*). En la perforación 2 (*derecha*), la diferencia de impermeabilidad existente entre los dos tipos de roca permite la concentración del hidrógeno y su desorción del agua que lo contiene; de esta manera, el gas forma burbujas que ascienden por empuje hidrostático y dan lugar a una acumulación transitoria (*abajo a la derecha*), en principio fácil de explotar. El primer caso corresponde al ejemplo de Kansas; el segundo plasmaría lo que se cree saber sobre las acumulaciones de Mali.

POUR LA SCIENCE, SEGÚN LOS AUTORES

lo permiten como a procesos biológicos en las formaciones más superficiales y, por tanto, más frías.

Por el contrario, el origen del hidrógeno hallado en medios continentales no se ha identificado todavía con certeza y es objeto de diferentes hipótesis. En cualquier caso, las emisiones se encuentran asociadas, ya sea a formaciones sedimentarias, ya sea a formaciones plutónicas (granitos o gneis). El primer criterio de prospección es la existencia de ciertas depresiones circulares, cuyos diámetros van de centenares de metros a varios kilómetros y que alcanzan profundidades de entre unos centímetros y pocos metros. Tales estructuras pueden formarse en menos de dos años.

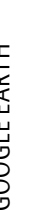
Las depresiones podrían deberse a la pérdida de agua que, transformada en hidrógeno, escapa del subsuelo y provoca el colapso del terreno. En el interior de estas estructuras se han medido flujos de hidrógeno significativos: decenas de miles de metros cúbicos por día y por estructura. Al mismo tiempo, no se ha descubierto ningún flujo fuera de ellas.

Para explicar la emisión de hidrógeno natural, Nikolay Larin, del Instituto Schmidt de Física de la Tierra de Moscú, y sus colaboradores proponen que se trataría de un hidrógeno profundo, primordial, atrapado en hidruros metálicos (estructuras cristalinas que combinan átomos de hidrógeno y metales) en el seno del núcleo terrestre, el cual se liberaría gradualmente y migraría hacia la superficie con el paso del tiempo geológico. Pero esta hipótesis choca con el largo ascenso del hidrógeno a través de las rocas (óxidos) del manto terrestre. Es difícil pensar que las moléculas de H_2, muy reactivas, puedan alcanzar la superficie sin haberse enlazado químicamente a otros elementos o compuestos.





LAS DEPRESIONES asociadas a emisiones de hidrógeno pueden formarse en muy poco tiempo. El fenómeno queda patente en estas imágenes por satélite de Elektrostal, al este de Moscú. En 2002 no se observaba ninguna estructura en la cubierta vegetal (un bosque), pero en 2004 se detectó una depresión circular de unos 180 metros de diámetro cuya aparición vino acompañada de la muerte de los árboles situados en su interior. En ella se descubrieron emanaciones de hidrógeno.



DIVERSAS HIPÓTESIS

Otra de las teorías remite a la radiólisis del agua, es decir, la descomposición de las moléculas de agua por efecto de la radiactividad natural, sobre todo la procedente del uranio. Este fenómeno se encuentra bien documentado; por ejemplo, se ha observado en formaciones geológicas de Gabón de 2000 millones de años de antigüedad. Sin embargo, creemos que los contenidos residuales de uranio radiactivo presentes actualmente en las rocas solo contribuirían marginalmente a la producción de hidrógeno.

La hipótesis por la que nos inclinamos para explicar la génesis del hidrógeno continental no se aleja demasiado de la que explica la procedencia del hidrógeno oceánico: la reducción del agua por acción de un metal que pueda oxidarse. El elemento químico más abundante que podría cumplir esa condición es el hierro, ya que presenta varios estados de oxidación posibles. Como ya hemos mencionado, entre su estado metálico (que no existe de forma natural en la Tierra salvo en el núcleo del planeta y en los meteoritos de hierro) y el hierro férrico, o Fe^{3+} (más conocido como herrumbre), existe un estado de oxidación intermedio: el hierro ferroso, o Fe^{2+}. La desestabilización de un mineral que contiene hierro ferroso posibilita una reacción en la que el agua se reduce a H_2, mientras que el hierro ferroso se transforma en férrico.

Así, el siguiente paso consiste en hallar en la corteza continental minerales que contengan hierro ferroso y que, por efecto de un aumento de la temperatura y la presión debido a su enterramiento, puedan desestabilizarse y causar que el hierro ferroso se incorpore a las aguas subterráneas. Vincent Milesi, del Instituto de Física del Globo de París, y sus colaboradores han estudiado hace poco uno de los candidatos. Se trata de la siderita ($FeCO_3$), un carbonato de hierro. Se desestabiliza a una temperatura relativamente baja (unos 200 grados Celsius) y solo contiene hierro ferroso, el cual puede reducir el agua para producir hidrógeno según la reacción $3FeCO_3 + H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 3CO_2 + H_2$. No obstante, aunque no se hayan realizado todavía los correspondientes estudios experimentales, cabe considerar muchos otros minerales: cloritos ferrosos, piroxenos, anfíboles, micas, etcétera.

Se ha descubierto hidrógeno continental en casi todos los continentes: en Rusia, en Estados Unidos (en Kansas y Carolina del Norte, donde también existen estructuras circulares que emiten hidrógeno), Brasil, Mali e incluso en el oeste de Francia. Pero, por ahora, solo se han hecho perforaciones en Mali y Kansas para extraer el gas. En los otros lugares se han llevado a cabo estudios geoquímicos de superficie consistentes en medir las concentraciones de hidrógeno en el suelo, a alrededor de un metro de profundidad, con el fin de determinar los flujos de emisión hacia la atmósfera.

Hemos de recordar que el hidrógeno es un gas altamente reactivo y de gran movilidad, así que no puede analizarse de la misma

OTRAS VENTAJAS

Presencia de helio

El helio, un gas que se halló por primera vez en cantidades explotables en 1903 en la perforación de Dexter, en Kansas, constituye hoy un importante mercado estratégico, principalmente para la electrónica. Los raros yacimientos de hidrógeno natural estudiados en medios continentales presentan concentraciones de este gas superiores a las observadas en la mayoría de los yacimientos de metano, la única fuente actual de helio. Las concentraciones asociadas al hidrógeno continental se sitúan entre el 1 y el 2 por ciento; es decir, superan entre tres y seis veces el umbral a partir del cual resulta rentable una explotación industrial. Por tanto, este sería otro factor a tener en cuenta a la hora de evaluar la explotación del hidrógeno natural.

manera que el metano. No se trata de un gas fósil acumulado a lo largo del tiempo geológico, que se mide en millones de años, sino de uno cuya tasa de producción es la misma que la de su emisión hacia la atmósfera. Por tanto, los flujos de emisión calculados en las campañas geoquímicas de superficie representan los flujos que se espera captar en futuras explotaciones y, además, de manera duradera, sin agotar los yacimientos.

POSIBLES ACUMULACIONES

¿Hemos de concluir, pues, que no existen acumulaciones de hidrógeno gaseoso? El ejemplo de Mali, donde de forma casual se descubrió una de ellas en la década de los setenta al excavar un pozo de agua, demuestra que existen e indica que probablemente también existan en otros lugares. Toda acumulación en el subsuelo, sea de petróleo, metano o hidrógeno, es transitoria, al igual que un atasco de tráfico: en estos, la disminución de la velocidad de los vehículos provoca un aumento de la densidad (y, por tanto, una acumulación) allí donde se frenan, pero el flujo continúa y los automóviles terminan llegando a su destino. Del mismo modo, las moléculas de gas acaban dispersándose en la atmósfera.

Las depresiones circulares asociadas a emisiones de hidrógeno pueden formarse en menos de dos años

Lo que cuenta es el tiempo característico de la acumulación: unas horas en el caso de un atasco de tráfico, millones de años si se trata de hidrocarburos, y, muy probablemente, unos años o pocas décadas para el hidrógeno natural. A escala humana, hablamos de energías fósiles al referirnos a los hidrocarburos y de energía de flujo al referirnos al hidrógeno, pero cada una de estas expresiones no es más que una simplificación vinculada a escalas de tiempo distintas.

¿Dónde cabe esperar la presencia de emisiones de hidrógeno continental? Hemos constatado que la proximidad a grandes fallas profundas que, aun siendo antiguas, puedan haberse reactivado recientemente constituye un buen criterio de búsqueda. A pesar de que en el oeste de Francia no se espera detectar depresiones circulares debido a la actividad humana, en mayo de 2015 medimos cerca de Granville y la punta de Grouin, a lo largo de las grandes fallas del dominio norarmoricano, unos flujos de hidrógeno natural del mismo orden que los observados en el interior de las depresiones. En otras regiones donde siguen siendo visibles las depresiones circulares (lugares de terreno suelto y sin bosques o actividad humana), se observa que tales estructuras se alinean, a escala continental, a lo largo de los grandes accidentes tectónicos ya cartografiados.

Recapitulemos los tres tipos de fuentes de hidrógeno natural. En primer lugar tenemos las del fondo oceánico, cuyo interés industrial queda todavía muy lejos. En segundo, las asociadas a las ofiolitas, que, pese a ser mucho más accesibles que los fondos marinos, tienen flujos modestos y están asociadas a formaciones rocosas nada fáciles de explotar (zonas montañosas y rocas impermeables carentes de una porosidad que permita acumulaciones temporales de gas). Por último, las fuentes ubicadas en el seno de los viejos continentes son las más prometedoras. Presentan los flujos más intensos y una accesibilidad óptima. Y, lo que es más: se sabe, a partir de las escasas perforaciones realizadas, que existen acumulaciones transitorias que podrían explotarse sin necesidad de captar los flujos en superficie, una operación más compleja técnicamente.

LA NECESIDAD DE UN MAYOR ESTUDIO

Así pues, hoy sabemos que en la naturaleza existe hidrógeno en cantidad suficiente como para pensar en emplearlo como fuente de energía. Hemos logrado establecer ciertos criterios para su prospección, sobre todo en el dominio intracontinental: buscar en depresiones circulares o en grandes fallas. Sin embargo, quedan muchas incógnitas por despejar. ¿Cómo captar ese hidrógeno de manera eficiente? ¿Cómo detectar acumulaciones, más fáciles de explotar? ¿Cuáles son sus flujos, de una forma más cuantitativa? ¿Cuáles son los mejores medios de prospección? ¿Podrían alimentar los flujos superficiales una producción industrial de hidrógeno?

Hoy todas estas preguntas siguen en el aire. Solo la elaboración de estudios multidisciplinares de investigación y desarrollo permitirá responderlas con precisión. En cualquier caso, en algunos lugares piloto, como Kansas y Mali, ya se producen modestas cantidades hidrógeno.

Como hemos visto, la explotación del hidrógeno natural presentaría un buen número de ventajas ambientales. Pero esta idea innovadora podría enfrentarse a algunas barreras, como los grupos de presión de otros nichos del sector energético o los cambios en la organización en nuestras sociedades requeridos por el uso de una energía descentralizada. ¿Estará dispuesta la humanidad a continuar explorando el potencial del hidrógeno natural para determinar si las promesas de hoy pueden convertirse en realidad? ¿O tal vez esta fuente de energía nunca tendrá gran importancia? Solo invirtiendo y trabajando en ello sabremos si el hidrógeno natural formará parte o no de la aventura humana. IyC

PARA SABER MÁS

Natural molecular hydrogen seepage associated with surficial, rounded depressions on the European Craton in Russia. N. Larin et al. en *Natural Resources Research*, vol. 24, n.º 3, págs. 369-383, publicado en línea en noviembre de 2014.

L'hydrogène naturel: Une source potentielle d'énergie propre et renouvelable. É. Deville y A. Prinzhofer en *Géologues*, n.º 185, págs. 105-110, junio de 2015.

Hydrogène naturel: La prochaine révolution énergétique? A. Prinzhofer y É. Deville. Belin, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

En torno a una economía del hidrógeno. Matthew L. Wald en *IyC*, julio de 2004.

Una red de energía para la economía del hidrógeno. Paul M. Grant, Chautcey Starr y Thomas J. Overbye en *IyC*, septiembre de 2006.

Sistemas de almacenamiento energético. Ferdi Schüth en *IyC*, septiembre de 2012.

Hidrógeno: ¿una energía limpia para el futuro? Vincent Artero, Nicolas Guillet, Daniel Fruchart y Marc Fontecave en *IyC*, octubre de 2012.



NEUROCIENCIA

EL PODER DEL CEREBRO INFANTIL

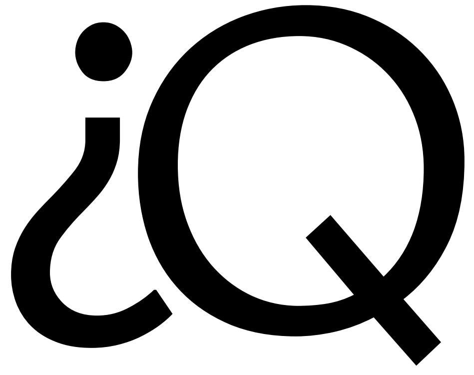
Conocer los períodos de aprendizaje intenso durante la infancia podría ayudar a corregir trastornos neurológicos y psiquiátricos en la edad adulta

Takao K. Hensch

HARRY CAMPBELL

Takao K. Hensch es profesor de neurología en la Escuela de Medicina de Harvard y en el Hospital Infantil de Boston, así como de biología molecular y celular en el Centro de Neurociencia de Harvard.





ué suena en su reproductor de música? Si tiene más de 30 años, probablemente canciones de sus años de mocedad. La infancia y la adolescencia son los períodos más influyentes en la vida de una persona. Los primeros recuerdos y vivencias son esenciales para la forja del carácter y calan hondo en todo lo que vendrá después. Hace más de 2000 años Aristóteles ya dijo: «Los hábitos que adquirimos en la niñez no son banales; de hecho, son fundamentales».

Los últimos descubrimientos de la neurociencia dan luz nueva a ese proverbio. El trabajo de los últimos quince años ha revelado con más claridad cómo se forman los circuitos cerebrales de los niños y los bebés, y cómo manipularlos para tratar las enfermedades neurológicas y psiquiátricas más graves.

Durante intervalos de meses o incluso años de desarrollo intensivo, conocidos como períodos críticos, se establecen las conexiones correctas en el cerebro. La mayor parte ocurren durante la infancia, pero algunos suceden más tarde, en la adolescencia. Se han identificado períodos críticos para la vista, la audición, el lenguaje y varias formas de interacción social. Durante cada período, el cerebro del niño experimenta un íntimo baile con el mundo exterior. Las ondas sonoras y los fotones que le llegan sirven de señal para que la maquinaria molecular del cerebro cree y seleccione las conexiones neurales que perdurarán durante la vida adulta y la vejez.

Si un período crítico se adelanta o se demora demasiado o no concluye a su debido tiempo, las consecuencias pueden ser nefastas. El niño puede quedar parcialmente ciego o predispuesto a sufrir trastornos como el autismo. Un bebé con, digamos, una catarata hereditaria que le impide ver perderá visión en el ojo afectado porque las conexiones neurales no se establecerán debidamente durante un período crítico que comienza cuando es lactante y que se va cerrando gradualmente hasta acabar a los 8 años. Una vez concluido, el niño tiene una probabilidad ínfima de ver con normalidad algún día con ese ojo.

Esas fases formativas se descubrieron hace más de medio siglo. (Torsten N. Wiesel y el fallecido David H. Hubel recibieron el premio Nobel en 1981 por haber contribuido a su hallazgo.) Desde entonces, la creencia general sostenía que los períodos críticos eran efímeros y que, una vez finalizados, no era posible la vuelta atrás. Nuevas técnicas moleculares aplicadas a su estudio han permitido refutar muchas de esas ideas predominantes. Por medio de experimentos en animales y de algunos estudios en humanos se ha demostrado que es posible reabrir un período crítico mucho tiempo después para reparar un cerebro que no funcione bien.

Ello abre un abanico de opciones sorprendente. Quizás un día seamos capaces de modificar los interruptores químicos que restablecen intervalos cruciales, permitiendo al cerebro reorganizar sus circuitos, y así tratar trastornos neurológicos y psiquiátricos, desde la ambliopía (ojo vago) hasta la psicosis. Entender lo que sucede en el cerebro del bebé podría servir para algo más que concebir nuevos medicamentos; podría aportar a educadores, psicólogos y diseñadores de políticas un conocimiento fundamental sobre los procesos básicos del desarrollo infantil o las consecuencias de las negligencias parentales, que les ayudaría a adaptar la escolarización a las capacidades de cada niño en cada etapa del desarrollo cerebral.

GATILLOS Y FRENOS

El cerebro cambia todo el tiempo, no solo en la infancia. Los neurocientíficos lo llaman plasticidad. Cuando uno aprende a hacer malabares o a usar una nueva aplicación del teléfono, ocurren sutiles variaciones en las sinapsis (puntos de conexión entre las neuronas). El perfeccionamiento de una nueva habilidad acarrea cambios bioquímicos en las neuronas, lo que da

EN SÍNTESIS

El cerebro infantil madura la visión y otras funciones durante períodos críticos, en los que está preparado para experimentar cambios duraderos en respuesta a los estímulos sensoriales y sociales.

Los períodos críticos comienzan en momentos precisos durante el transcurso de la infancia y la adolescencia, con el fin de modificar las conexiones neurales. Tal capacidad se denomina plasticidad cerebral.

Conocer mejor las moléculas que ponen inicio y fin a los períodos críticos ha permitido adquirir cierto control del momento en que ocurren y, con ello, recuperar parte de la plasticidad en la vida adulta.

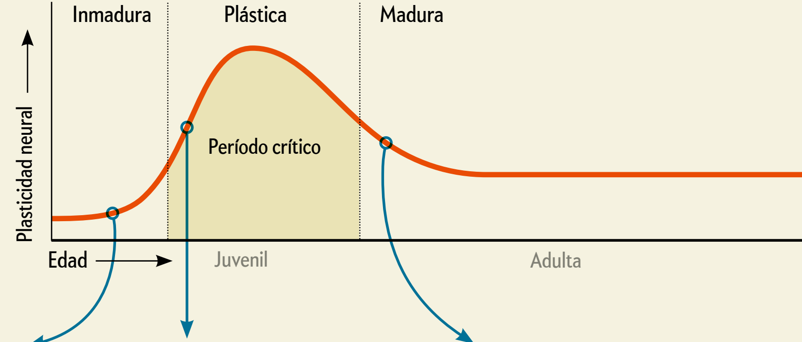
El estudio de la regulación del desarrollo temprano podría redundar en fármacos o métodos que reinicien los períodos críticos años más tarde a fin de corregir problemas surgidos en esa etapa.

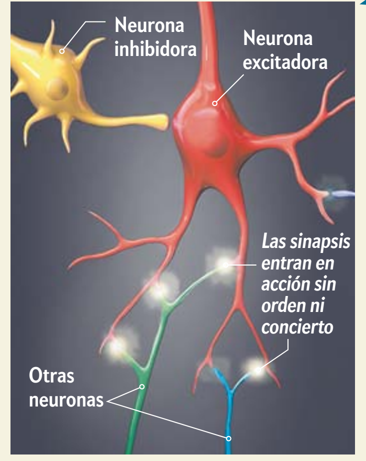
El cerebro se abre al mundo

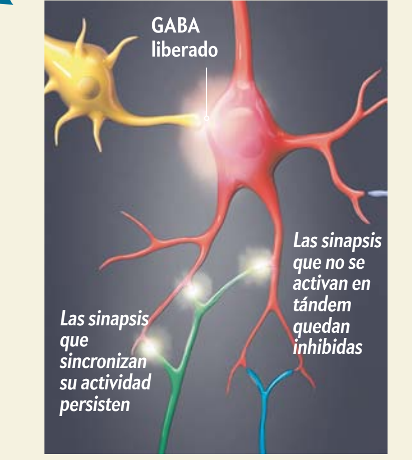
En las primeras etapas de la vida, las imágenes, los sonidos y demás estímulos sensoriales guían el proceso de desarrollo nervioso del niño, que se produce en períodos críticos. Durante uno de ellos, la información visual captada parece calibrar la corteza cerebral con el mundo exterior. Los estímulos visuales determinan qué neurona se conecta con otra para responder de la mejor manera a las señales procedentes del ojo.

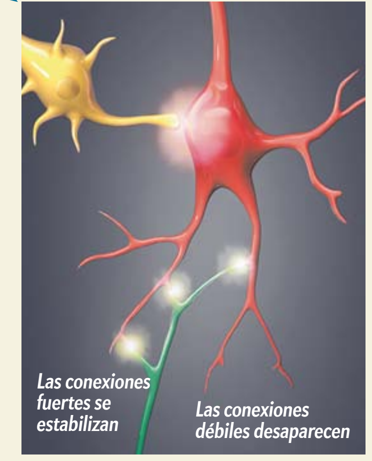
Los cambios

Las neuronas del cerebro inmaduro son muy activas, pero dicha actividad es desordenada. El neurotransmisor GABA orquesta la plasticidad cerebral del período crítico y solo aquellas sinapsis que sincronizan su actividad sobreviven, mientras que las demás son inhibidas y en última instancia eliminadas. Una vez que el período crítico acaba, la capacidad para reducir las sinapsis disminuye.









Reinicio

El conocimiento sobre los procesos moleculares que propician la plasticidad en el período crítico ha permitido usar fármacos o terapias conductuales, tales como el ejercicio físico, para demostrar que las conexiones del cerebro pueden moldearse a edades mucho más tardías de lo que se pensaba.



MESA SCHUMACHER (*neuronas*), JEN CHRISTIANSEN (*gráficas*)

lugar a trasmisiones más fuertes o más débiles a través de las sinapsis. Este tipo de plasticidad básica persiste durante toda la vida. Siempre puede aprenderse algo nuevo.

En los períodos críticos de la infancia temprana, empero, acontecen cambios especialmente importantes. El bebé nace con una densa red de sinapsis que debe aclarar para que opere correctamente. Los cambios estructurales necesarios —el sacrificio de una parte de ellas— ocurren durante el período crítico.

Los científicos que estudian esas fases a menudo se centran en el sistema visual, porque es relativamente sencillo de manipular. Poco tiempo después del nacimiento, la corteza visual, ubicada en la parte posterior de la cabeza, comienza a reaccionar a la luz captada por el ojo y transmitida por el nervio óptico.

Lo que el ojo ve estimula a las células de la corteza visual. Algunas se activan a la vez, lo que crea nuevas sinapsis entre

ellas (proceso que dio lugar a un repetido dicho: «Las células que se activan juntas, permanecen conectadas». Las sinapsis desacompasadas que no se comunican al unísono se descartan. El período crítico en que se conecta el sistema visual del cerebro infantil termina al cabo de unos años, y las conexiones finales se mantienen toda la vida.

Los estudiosos de la neurobiología del desarrollo infantil quieren controlar el momento en que ocurren esos períodos críticos para corregir las oportunidades perdidas o los errores acaecidos durante la creación de las conexiones neurales en el sistema nervioso inmaduro. Con ese fin han buscado un grupo de interruptores moleculares (gatillos y frenos) que marquen el comienzo y el fin de esos intervalos.

Un descubrimiento fundamental sobrevino al examinar una importante molécula de señalización cerebral. El neurotransmisor GABA (abreviatura de ácido gamma-aminobutírico) se conoce principalmente por aplacar la actividad de las neuronas. En nuestro laboratorio descubrimos que el GABA (junto con otras moléculas afines) desempeña un cometido básico en la delimitación del momento en que comienza y terminan los períodos críticos. De hecho, hallamos un tipo de neurona productora de GABA, la célula en cesta grande positiva a la parvoalbúmina, que seguramente orquesta el proceso entero.

A primera vista, una neurona parvoalbumínica no parece la más adecuada para la tarea de comenzar un período crítico. De ordinario, el GABA silencia la actividad neural. ¿Por qué entonces debería desencadenar uno de los acontecimientos más intensos del desarrollo infantil? Resulta que el neurotransmisor pone orden en una situación que de otro modo sería caótica.

Durante los primeros meses de vida, el cerebro siempre está activo. Las neuronas, como células excitables que son, se activan sin orden ni concierto, como el galimatías de una muchedumbre donde todos hablan al mismo tiempo. Solo aparecerá un asomo de orden cuando el período crítico dé comienzo. El GABA segregado por las células parvoalbumínicas ordena a las neuronas que se calmen y que «hablen» por turnos; lo hacen extendiendo largos tentáculos que forman conexiones. Los axones, como así se llaman, rodean como una cesta los somas cercanos, los cuerpos centrales de las neuronas. Y cuando los alcanzan, reducen la actividad de esas células, y permiten así que emitan señales claras y concisas (y alcanzar lo que llamamos un equilibrio entre la excitación y la inhibición).

En nuestra investigación observamos con suma atención este proceso en el sistema visual de los roedores. Comenzamos modificando genéticamente ratones para disminuir sus niveles de GABA. Como consecuencia, el período crítico no comenzaba cuando debía. Más tarde, cuando administramos un fármaco benzodiacepínico, como el Valium, que aumenta la señalización por GABA, el período crítico volvía a su cauce.

Los experimentos demostraron que podíamos, en principio, controlar con precisión el inicio, la duración y el fin de los períodos críticos. Este descubrimiento tiene importantes implicaciones en el tratamiento de trastornos que afectan al desarrollo nervioso. Estudios con animales en varios laboratorios han demostrado ahora que tanto la alteración de los genes como el estrés ambiental pueden perturbar el frágil equilibrio entre la excitación y la inhibición y poner en marcha un período crítico en el momento incorrecto. Ahora se comienza a estudiar si la corrección de la cronología de los períodos críticos podría un día prevenir o tratar el autismo, la esquizofrenia u otros trastornos neurológicos mediante la restauración del equilibrio deseado.

REGRESO AL FUTURO

Pasarán años, tal vez décadas, antes de que las técnicas más ambiciosas ensayadas con animales puedan llegar a los pacientes. Comprender los períodos críticos, sin embargo, también ha dado pie a ideas sugerentes, como el recurrir a fármacos que ya están en el mercado para restaurar en cierta medida la plasticidad en el cerebro adulto.

Un objetivo a largo plazo sería dar la vuelta al reloj biológico y reiniciar un período crítico. En la Universidad de California en San Francisco, un laboratorio trató de hacerlo en roedores trasplantando células embrionarias que engendran neuronas productoras de GABA en cerebros más desarrollados, después del nacimiento. Al trasplante le siguió otro período crítico pero solo cuando esas células cumplieron el mes de edad, un claro indicio de que el momento está regulado por genes específicos. Cuando en el laboratorio eliminamos esos genes sincronizadores en animales jóvenes, incluso el período crítico normal retrasó su comienzo.

Otra estrategia no menos ardua para restaurar la plasticidad consistiría en eliminar las trabas que impiden el reinicio de los períodos críticos. Uno de los límites de la plasticidad reside en una red de moléculas de apariencia cartilaginosa llamada red perineuronal. Rodea paulatinamente a las neuronas parvoalbumínicas a medida que maduran, hasta que acaba poniendo fin al período crítico y evita que las sinapsis sigan sufriendo cambios estructurales.

La red perineuronal consiste básicamente en proteoglucanos de condroitín sulfato, un complejo molecular de proteínas cubiertas de azúcares. Los frenos a la plasticidad desaparecen cuando esas moléculas son digeridas por enzimas. Un equipo anglo-italiano rescató ratas ancianas con ambliopía tras inyectarles en el cerebro una enzima, una condroitinasa, que disolvió la red perineuronal. En ese momento, se abrió un nuevo período crítico. Las ratas recibieron los estímulos visuales necesarios que se habían perdido siendo crías y recuperaron la visión.

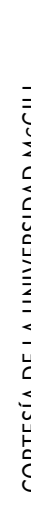
Investigadores del Instituto Friedrich Miescher para la Investigación Biomédica adoptaron un enfoque parecido. Primero entrenaron ratas para que respondieran con miedo a cierto estímulo (acobardándose, por ejemplo, con el son de una campana). Los recuerdos sobre experiencias aterradoras se almacenan en neuronas de la llamada amígdala cerebral. La eliminación de la red perineuronal que rodea esas células inició un período crítico. Los animales superaron con éxito un nuevo entrenamiento en que se les condicionaba a dejar de temer el estímulo, como cualquier cría de rata normal.

La seguridad de un procedimiento que requiere la inyección de una enzima en zonas profundas del cerebro pasaría por intensos controles de la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de los Estados Unidos, por lo que esta sustancia no será aprobada en breve. Algunos fármacos ya existentes, sin embargo, pueden aumentar hasta cierto punto la plasticidad cerebral. Nuestro laboratorio ha colaborado en un estudio piloto con un fármaco genérico contra la epilepsia y el trastorno bipolar que permite que un adulto aprenda cosas nuevas casi con la misma presteza que en la infancia.

El fármaco en cuestión elimina otro freno de la reorganización de las conexiones cerebrales. Se trata de un inhibidor de las histonas desacetilasas (HDAC), enzimas que se fijan fuertemente al ADN y paralizan la producción de las proteínas que promueven la plasticidad cerebral. Queríamos comprobar si la plasticidad inducida permitiría a un grupo de adultos adquirir un oído absoluto o «natural», una habilidad que normalmente



LA TERAPIA con una versión especial del videojuego Tetris aprovecha la plasticidad cerebral para hacer que ambos ojos trabajen en tándem, lo que mejora la visión de un sujeto con ambliopía, una discapacidad en el que un ojo exhibe una agudeza visual mayor que el otro.



es preciso aprender antes de los seis años estudiando música. Varones sanos en la veintena recibieron el fármaco y se les enseñó a distinguir notas en tres octavas. Ninguno de los jóvenes desarrolló de inmediato el oído absoluto por el mero hecho de tomar el fármaco, pero al cabo de dos semanas de entrenamiento reconocían bastante mejor las notas que un grupo de características similares que había recibido un placebo.

Los fármacos que suelen emplearse para aumentar la presencia de otros neurotransmisores (acetilcolina, serotonina y otras moléculas que controlan indirectamente la frecuencia de activación de los circuitos neurales) también pueden ayudar a restaurar la plasticidad. La acetilcolina hace que las neuronas emitan señales muy concisas en momentos de excitación. Lo hace ajustando el equilibrio entre la excitación y la inhibición en un proceso prácticamente igual al de un período crítico.

El Hospital Infantil de Boston está llevando a cabo un ensayo clínico para averiguar si un fármaco contra la enfermedad de Alzheimer que aumenta la disponibilidad de acetilcolina, el donepezilo, puede restaurar la visión normal en jóvenes adultos con ambliopía al eliminar un freno de la plasticidad. Cuanta más acetilcolina se añade, más puede unirse a sus receptores en las neuronas. Eso limita la capacidad de una molécula inhibidora de la plasticidad (Lynx1) para disminuir la actividad de esos receptores. Nuestros estudios previos han demostrado que la eliminación de esta sustancia, que es afín a una toxina de serpiente, reaviva la plasticidad.

La acetilcolina no es el único neurotransmisor que ayudaría a tratar la ambliopía. Los antidepresivos que aumentan los niveles de serotonina, como el Prozac, la han logrado corregir en experimentos con ratas. En ciertos casos, ni siquiera es preciso recurrir a fármacos. Los videojuegos de acción o la meditación también promueven un estado de plasticidad aumentado y se estudian como posibles tratamientos contra la ambliopía o el trastorno por déficit de atención o hiperactividad, entre otras alteraciones.

Todos los que investigan los períodos críticos a menudo se preguntan por qué, en primer lugar, existen esos límites en el aprendizaje. La capacidad para aprender, digamos, chino de adulto con tanta facilidad como en la niñez beneficiaría claramente a los miembros de una especie tan social como la nuestra. ¿Por qué, entonces, el cerebro humano y el de tantos otros animales impone límites a su maleabilidad? ¿Entraña algún peligro la reapertura de un período crítico cuando queremos aprender una nueva habilidad? ¿Acaso la genialidad no es «la infancia recuperada a voluntad», como escribiera el poeta francés Charles Baudelaire?

La restricción de la plasticidad puede haber evolucionado para proteger las neuronas. La alta demanda energética de las células parvoalbumínicas genera radicales libres que dañarían el tejido cerebral (una posible razón de ser de la red perineural). Las autopsias de los cerebros de pacientes con esquizofrenia y otras enfermedades mentales revelan una pérdida generalizada de las redes perineuronales y de los frenos de plasticidad asociados.

El alzhéimer puede dar pistas acerca de los peligros de la plasticidad desenfrenada. Áreas cerebrales de alto procesamiento tales como la corteza asociativa, responsable de funciones cognitivas complejas, conservan la plasticidad toda la vida. Estas regiones contienen menos proteoglucanos de condroitín sulfato que cierran los períodos críticos; también son las primeras en sufrir la muerte celular que caracteriza a esta enfermedad neurodegenerativa.

Hay también argumentos filosóficos que enfatizan lo arriesgado que sería dejar que el cerebro cambiara mucho. La apertura y el cierre a voluntad de los momentos críticos podría mejorar el tratamiento de las enfermedades neurológicas. Pero la identidad básica del individuo también se moldea durante esos procesos formativos. A medida que la humanidad idee medios técnicos cada vez más ingeniosos para modificar su entorno, estará tentada de hallar nuevas maneras de mejorar la plasticidad en la edad adulta para adaptarse a los cambios vertiginosos que sucederán a su alrededor. Si la reactivación de la plasticidad no se toma con sumo cuidado, la reorganización de las conexiones cerebrales podría debilitar el sentido de uno mismo. No debemos olvidar tan molesta contrapartida mientras sigamos tentados de crear nuevos métodos para recobrar la plasticidad infantil perdida. IyC

PARA SABER MÁS

Neurodevelopment: Unlocking the brain. Jon Bardin en *Nature*, vol. 487, págs. 24-26, 4 de julio, 2012. **www.nature.com/news/neurodevelopmentunlocking-the-brain-1.10925**

Re-opening windows: Manipulating critical periods for brain development. Takao K. Hensch y Parizad M. Bilimoria en *Cerebrum*. Publicado en línea el 29 de agosto, 2012. **http://tinyurl.com/pyg9jjc**

Balancing plasticity/stability across brain development. Anne E. Takesian y Takao K. Hensch en *Changing Brains: Applying Brain Plasticity to Advance and Recover Human Ability*, dirigido por Michael M. Merzenich et al. Elsevier, 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Plasticidad cerebral. Marguerite Holloway en *IyC*, noviembre de 2013.

La plasticidad del cerebro adolescente. Jay N. Giedd en *IyC*, agosto de 2015.

Cómo adquieren los bebés el lenguaje. Patricia K. Kuhl en *IyC*, enero de 2016.

por Júlia Costa, Mireia Vilalta y Verónica Fuentes

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

Animales que crecen con la luz

La medusa *Cassiopeia xamachana*, que establece simbiosis con algas fotosintéticas, apenas se desarrolla si no hay luz



UN EJEMPLAR ADULTO de *C. xamachana* reposa sobre el fondo, con los tentáculos hacia arriba para capturar la luz.

En el medio marino, los vegetales no son los únicos que necesitan la luz para vivir. Existe una gran variedad de especies animales que crecen gracias a la simbiosis con algas unicelulares, las cuales realizan la fotosíntesis para obtener energía. El caso más conocido corresponde a los corales que forman los arrecifes coralinos. Pero hay otros cnidarios que también cuentan con las algas simbiontes para desarrollarse. Uno de los ejemplos más llamativos es el de *Cassiopeia xamachana*, una medusa de aguas tropicales que suele vivir sobre el fondo marino, con sus ocho tentáculos orientados hacia arriba, en busca de la luz. Permanece casi todo el tiempo inmóvil sobre el fondo con el fin de exponer al máximo su superficie para capturar la luz. De vez en cuando, las medusas nadan para atrapar presas con la ayuda de sus células urticantes y completan así su dieta heterotrófica.

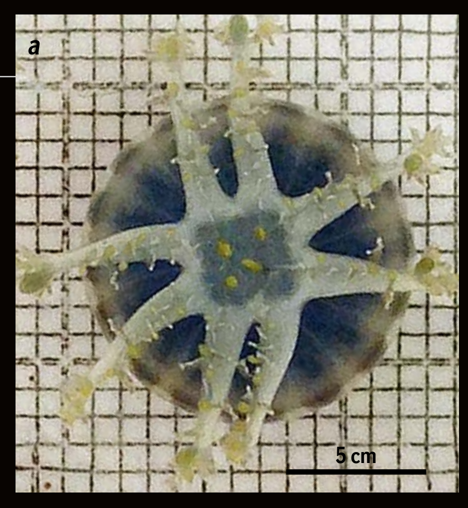
Las algas simbiontes desempeñan una función esencial en la subsistencia de la medusa. A tal conclusión ha llegado nuestro grupo tras estudiar en acuarios el crecimiento de varios ejemplares, algunos expuestos a luz constante y otros sin recibir apenas iluminación. Los experimentos han ofrecido resultados espectaculares: las medusas con iluminación han crecido mucho más y han adquirido una coloración mucho más intensa que las que han permanecido casi a oscuras. Además, hemos observado que, en ambas situaciones de iluminación, los cnidarios se han seguido alimentando de presas animales, en este caso, larvas del crustáceo *Artemia salina*. Nuestros datos demuestran que las algas simbiontes resultan vitales para el desarrollo de *C. xamachana* y que los nutrientes suministrados por las algas a la medusa no pueden ser sustituidos por los aportados con la captura de presas. Con el ejemplo de *C. xamachana* se pone de manifiesto, una vez más, el éxito que ha representado para numerosas especies la simbiosis entre los animales y las algas en la naturaleza.

—Júlia Costa, Mireia Vilalta y Verónica Fuentes
Instituto de Ciencias del Mar (CSIC)
Barcelona

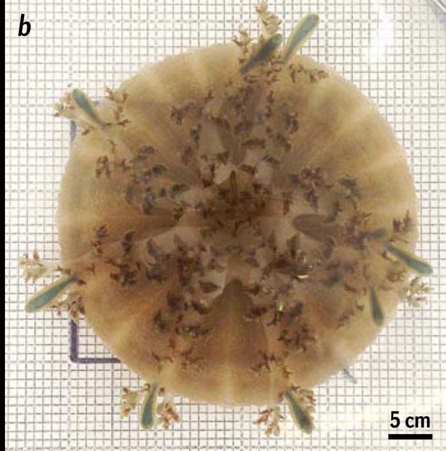
FOTOGRAFÍAS DE EDUARDO OBIS



LOS DOS TENTÁCULOS de *C. xamachana* son de un color verde intenso, lo que demuestra su elevada concentración en algas simbiontes.



CRECIMIENTO CON O SIN LUZ. Cuando se mantiene a *C. xamachana* en el acuario alimentada con larvas de *Artemia* y sin apenas luz durante seis meses, la medusa crece muy poco (*a*). En comparación, los ejemplares que reciben larvas e iluminación constante, llegan a cuadriplicar su tamaño inicial (*b*).



LAS ALGAS FOTOSINTÉTICAS SIMBIONTES forman agregados de color pardo en los tejidos de la medusa en su estadio juvenil.

JÚLIA COSTA Y MIREIA VILALTA (*crecimiento con y sin luz, a y b*)

por Frank von Hippel



Frank von Hippel es físico y profesor emérito de asuntos públicos e internacionales del Programa de Ciencia y Seguridad Global de la Universidad de Princeton.

La energía nuclear después de Chernóbil

El accidente no fue el único factor que la hizo impopular

Hace treinta años, en la madrugada del 26 de abril de 1986, dos explosiones volaron la tapa y el techo del reactor nuclear de la unidad 4 de la central de Chernóbil, en Ucrania, arrojando material radiactivo a la atmósfera. El escape, promovido por un violento incendio en el núcleo del reactor, se propagó en todas direcciones durante la semana siguiente. Al final, una superficie de 3110 kilómetros cuadrados quedó contaminada con niveles tan altos de cesio 137 que fue necesario evacuarla.

A primera vista, parece razonable concluir que el miedo generado por la catástrofe puso al público en contra de la energía nuclear, hasta tal punto que incluso ahora, tres décadas después, existen serias dudas de que llegue a convertirse nunca en una de las principales alternativas a los combustibles fósiles que amenazan nuestro ambiente. En los quince años anteriores al accidente entraron en funcionamiento, en promedio, unos veinte nuevos reactores nuecleares al año. Cinco años después, la media había caído a cuatro por año.

Pero la verdadera historia es más complicada. Los efectos de Chernóbil sobre las personas, aunque importantes, no fueron devastadores. Más allá de la zona evacuada, se estima que la radiación provocará decenas de miles de casos de cáncer en toda Europa a lo largo de 80 años. Pueden parecer muchos, pero en realidad suponen un incremento de la incidencia de cáncer casi indetectable. Una excepción es el cáncer de tiroides, causado por la ingestión de yoduros radiactivos: aquí sí que se han observado epidemias (solo entre un 1 y un 2 por ciento de los casos son mortales, afortunadamente) en las regiones más afectadas de Bielorrusia, Rusia y Ucrania.

Sin embargo, y a pesar de las muertes por cáncer que se prevé que causen Chernóbil y la catástrofe de la central japonesa de Fukushima Daiichi en 2011, parece que la energía nuclear sigue siendo más segura que el carbón, si hablamos en términos del número medio de fallecimientos por unidad de energía eléctrica generada. De acuerdo con un estudio realizado en 2010 por el Consejo Nacional de Investigación de EE.UU., si en 2005 se hubieran sustituido las 100 centrales nucleares de ese país por centrales de carbón, el aumento en la contaminación del aire habría provocado miles de muertes prematuras más cada año.

Pero las personas tienden a preocuparse más por el impacto a largo plazo de la radiación que por los efectos de la contaminación del aire. Un estudio sobre el bienestar psicológico de la población de Ucrania veinte años después de Chernóbil descubrió que una dosis extra de radiación equivalente a la radiación natural de fondo que recibimos durante un año se correlacionaba con una menor satisfacción personal, un aumento de los trastornos mentales diagnosticados y una menor esperanza de vida subjetiva.



Ese tipo de preocupaciones contribuyeron a la caída en el número de nuevas centrales construidas después de Chernóbil, pero hubo otras razones. Una fue que, más o menos por la misma época, el consumo de energía eléctrica en los países desarrollados se ralentizó porque el precio de la electricidad dejó de bajar. En 1974, la Comisión de Energía Atómica de EE.UU. pronosticaba que en 2016 este país precisaría el equivalente a 3000 grandes reactores nucleares. Hoy en día solo se necesitarían 500 para generar toda la electricidad que consumen, en promedio, los estadounidenses (aunque se necesitaría más potencia para hacer frente a los picos de demanda).

Otro factor es que la energía nuclear, si bien sus defensores en los años cincuenta propugnaban que iba a ser «tan barata que no harían falta contadores», resulta, por el contrario, bastante cara. Los costes de combustible son bajos, pero los de construcción son enormes, especialmente en Europa Occidental y Norteamérica: entre 5500 y 11.000 millones de euros por reactor. Esta cifra se debe, en parte, a las normas de seguridad más estrictas, pero también al hecho de que, al construirse menos centrales, hay menos trabajadores cualificados para hacerlo, lo que provoca costosos retrasos en las obras cuando hay que corregir errores. Hoy, el futuro de la energía nuclear está principalmente en manos de China. La mitad de los 50 reactores que empezaron a construirse a partir de 2008 se encuentran allí, y el sector nuclear chino está empezando a proponer proyectos en otros países. Sin embargo, el ritmo al que construye China sigue siendo muy inferior al que alcanzaron EE.UU. y Europa Occidental en la década de los setenta, y ahora el mundo consume energía eléctrica a un ritmo cuatro veces mayor que entonces. La Agencia Internacional de la Energía prevé que el porcentaje de electricidad que se genera con energía nuclear en el país asiático crecerá solo hasta el 10 por ciento de aquí a 2040.

Así pues, teniendo en cuenta la energía que necesitaríamos para desvincular nuestro consumo energético de los combustibles fósiles, podemos decir que la energía nuclear se ha convertido en una pieza útil pero con un papel menor. Chernóbil afectó negativamente a sus perspectivas de futuro, pero no es la única razón que explica el declive de esta tecnología.

ROSS MACDONALD

por Forest Rohwer y Anca M. Segall

Forest Rohwer y **Anca M. Segall** investigan en el Instituto de Información Vírica de la Universidad estatal de San Diego.

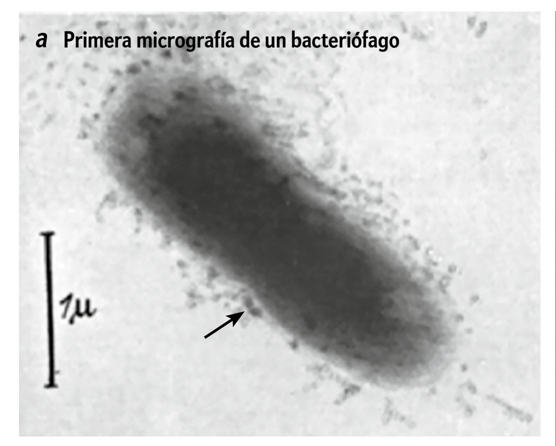
Un siglo de bacteriófagos

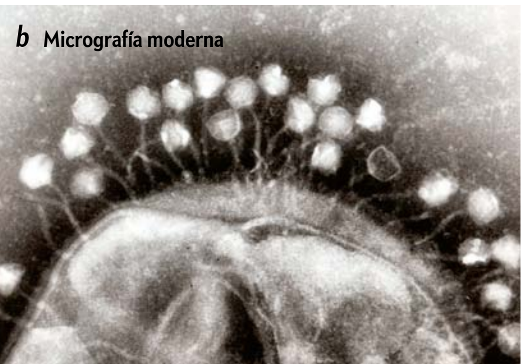
El estudio de estas fascinantes entidades biológicas ha contribuido de manera fundamental al desarrollo de la genética, la biotecnología y la medicina

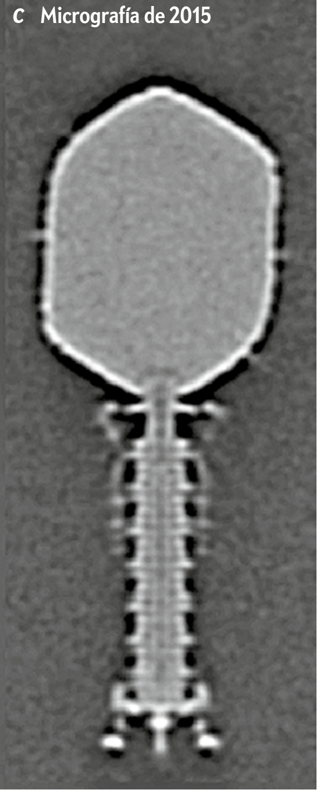
En 1915, el bacteriólogo Frederick Twort publicó el primer artículo sobre los virus que infectan bacterias, se replican en su interior y las matan. Desde entonces, el estudio los bacteriófagos, conocidos popularmente como «fagos», ha transformado la biología. Los fagos proporcionaron los sistemas experimentales y las herramientas que hicieron posible la revolución de la biología molecular del siglo xx, y su rápido crecimiento ha permitido comprobar en el laboratorio los principios fundamentales de la ecología y la evolución. Hoy sabemos que constituyen las entidades biológicas más exitosas del mundo, ya que son más abundantes y genéticamente más diversos que cualquier otra forma de vida. Sin embargo, y a pesar de su importancia, su estudio sigue estando circunscrito a un ámbito muy especializado. Creemos que conocer su historia puede inspirar a una nueva generación de biólogos.

A principios del siglo xx, la mayoría de quienes se dedicaban a investigar los fagos estaban interesados en usarlos como agentes antibacterianos. Era una época de ensayos no controlados, en los que los virus se inyectaban en las personas o se vertían en pozos de agua con la esperanza de acabar con bacterias patógenas, como las del cólera. Esta línea de investigación se vio reducida drásticamente tras el descubrimiento de los antibióticos por Alexander Fleming, en 1928. Hoy, sin embargo, el concepto de «terapia fágica» está resurgiendo a medida que aumenta la preocupación por la resistencia a los antibióticos.

El estudio de estos virus entró en la esfera cuantitativa cuando una red de biólogos, bioquímicos y físicos, conocidos como el Grupo de los Fagos, los usó como modelo para analizar el funcionamiento de la vida. En 1952, Alfred Hershey y Martha Chase llevaron a cabo un célebre experimento en el que separaron un grupo de fagos marcados radiactivamente de una población de bacterias; gracias a ello, lograron establecer que el ADN era el material genético. El descubrimiento de enzimas codificadas por fagos y que actuaban sobre el ADN, como las ADN- y ARN-polimerasas, las ligasas y las endo- y exonucleasas, aceleró el desarrollo de la biología molecular y de la biotecnología. En la actualidad, las proteínas fágicas se emplean a diario en todo el mundo. Y las enzimas de restricción que protegen a las bacterias de las infecciones causadas por fagos proporcionan otra herramienta indispensable para los biólogos moleculares. Esta tendencia continúa hoy, como puede verse en la revolución en edición genética







FAGOS EN ACCIÓN: Aunque el descubrimiento de los bacteriófagos se remonta a 1915, la primera micrografía electrónica de estas entidades biológicas (*a*, *flecha*) no se obtuvo hasta 1940; aquellas imágenes permitieron confirmar que los efectos atribuidos a los fagos estaban causados por virus, no por actividad enzimática. La microscopía electrónica moderna (*b*, *c*) ha revelado los detalles estructurales de estos virus y ha permitido entender el proceso de infección.

FUENTES: «DIE SICHTBARMACHUNG DER BAKTERIOPHAGEN LYSE IM ÜBERMIKROSKOP», H. RUSKA EN *NATURWISSENSCHAFTEN*, VOL. 28, PÁGS. 45–46, 1940 (*a*); GRAHAM BEARDS/CC-BY-3.0 (*b*); «STRUCTURAL REMODELING OF BACTERIOPHAGE T4 AND HOST MEMBRANES DURING INFECTION INITIATION», B. HU ET AL. EN *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES*, VOL. 112, PÁGS. 4919-4928, 2015 (*c*)

surgida a raíz del descubrimiento del sistema CRISPR-Cas, usado por las bacterias como defensa contra estos virus.

Tras el descubrimiento del código genético, a mediados del siglo xx, secuenciar un genoma completo se convirtió en una meta prioritaria. Los fagos eran un buen objeto de estudio, debido al reducido tamaño de su genoma y a la posibilidad de obtener grandes cantidades de ADN. Frederick Sanger y sus colaboradores secuenciaron el genoma completo del fago ΦX174 en 1977, décadas antes de que se completase la secuencia del primer genoma celular. A medida que se obtenían más genomas de bacteriófagos, se hizo evidente que estos virus intercambiaban genes y grandes secciones de ADN. El hallazgo de este mecanismo de transferencia horizontal de genes cambió el modo de entender la variabilidad genética. Las comunidades marinas de fagos fueron las primeras en someterse a secuenciación aleatoria (*shotgun sequencing*), lo que condujo a la metagenómica, o secuenciación en masa de todos los miembros de una comunidad.

Pero, además, el estudio de los fagos ha contribuido de manera fundamental a nuestro entendimiento de las células hospedadoras y de la enfermedad. Cuando los fagos se integran en el genoma de las bacterias, pueden modificar radicalmente las características de sus hospedadoras. Muchos de los patógenos bacterianos más mortíferos, como *Vibrio cholerae* y algunas especies de *Shigella* y *Salmonella*, adquieren factores de virulencia mediante este mecanismo. El estudio detallado de la replicación de los fagos también ha permitido descubrir varios factores clave que, codificados por el hospedador, resultan necesarios para el ciclo de vida del virus, como la enzima ADN-girasa y los complejos de proteínas chaperonas GroEL y GroES.

Cuando, en 1971, el entonces presidente de EE.UU. Richard Nixon declaró la «guerra al cáncer», se contrató a numerosos expertos en fagos para que se dedicasen a la investigación en biología humana. Sabiendo que estos virus codifican algunas proteínas similares a las de sus hospedadores, aquellos científicos buscaron en el genoma humano genes análogos procedentes de otros virus. No solo los encontraron, sino que desarrollaron el concepto de «protooncogén», genes presentes en nuestro genoma que, cuando mutan, desempeñan un papel clave en el desarrollo de cáncer.

Otros expertos en fagos pasaron a estudiar la mutagénesis, la reparación y la recombinación del ADN, y sentaron las bases de nuestro entendimiento actual del cáncer. Por ejemplo, saber que hay mutaciones preexistentes que pueden resultar ventajosas para el crecimiento de células individuales en diferentes condiciones ambientales llevó a la idea de que las células cancerosas podían albergar docenas de mutaciones preexistentes relacionadas o no con el propio tumor. Con la aparición del sida, los investigadores sobre fagos abrieron la puerta a entender la manera en que los retrovirus se integran en nuestro genoma y qué proteínas del hospedador intervienen en el proceso de integración.

El inconveniente de que tantos expertos en fagos acabasen en otros campos fue que, desde los años setenta, el estudio de estos virus pasó a un segundo plano. ¿Por qué, dado su extraordinario potencial? Una de las razones tal vez se deba a que, como ocurre con cualquier disciplina antigua, la bibliografía es densa, abundante en siglas y rica en nomenclatura cambiante. Con todo, algunos principios básicos pueden presentarse de manera simple.

Un primer aspecto clave lo hallamos en la contribución de los fagos a la diversidad biológica. Probablemente haya más de 10^{31} fagos en el planeta, unos diez por cada bacteria. En los humanos, la principal diferencia genética entre dos individuos se encuentra precisamente en los fagos de su intestino. Entre otras funciones, estos virus forman un sistema inmunitario adaptable que hace uso de dominios de proteínas hipervariables, parecidas a las inmunoglobulinas, similares a los utilizados por los anticuerpos.

La segunda idea es que los fagos son portadores de genes codificantes de proteínas que modulan algunos procesos fisiológicos fundamentales para el hospedador, como el metabolismo y la resistencia a los antibióticos. Un ejemplo fascinante lo hallamos en la fotosíntesis de las cianobacterias marinas. Los componentes de los complejos presentes en su antena de captación de luz se degradan ante una infección por fagos. Sin embargo, estos pueden incorporar genes que codifiquen proteínas que sustituyan a las dañadas, lo que permite a las bacterias seguir produciendo biomasa y a los fagos reproducirse en mayor cantidad. En consecuencia, al aumentar la eficacia y la producción de los procesos fotosintéticos, estos fagos marinos contribuyen a la copiosa renovación del carbono que tiene lugar en los océanos.

Una tercera lección es que el nicho de cualquier bacteria queda determinado por sus fagos. Las principales diferencias genómicas entre bacterias estrechamente relacionadas se deben a los fagos integrados (profagos) y a aquellas características que las ayudan a protegerse contra la infección, desde indeles (inserciones o deleciones) a grandes reordenamientos. Esa interminable presión selectiva de los fagos sobre las bacterias constituye el mejor ejemplo de la hipótesis de la Reina Roja, según la cual depredadores y presas deben evolucionar de manera constante.

¿Qué podemos esperar del futuro? Estos virus son relativamente fáciles de sintetizar y su genoma presenta características modulares atractivas para la biología sintética, pues permiten modificar las funciones biológicas. Cien años después de su descubrimiento, creemos que es hora de abandonar algunos hábitos de investigación excesivamente centrados en la célula y devolver a los bacteriófagos la atención que merecen. IyC

Artículo original publicado en *Nature* 528, págs. 46-48, 2015.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2016

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

An investigation on the nature of ultra-microscopic viruses. F. W. Twort en *The Lancet*, vol. 186, págs. 1241-1243, 1915.
Mutations of bacteria from virus sensitivity to virus resistance. S. E. Luria y M. Delbrück en *Genetics*, vol. 28, págs. 491-511, 1943.
Independent functions of viral protein and nucleic acid in growth of bacteriophage. A. D. Hershey y Martha Chase en *The Journal of General Physiology*, vol. 36, págs. 39-56, 1952.
The origins and ongoing evolution of viruses. R. W. Hendrix en *Trends in Microbiology*, vol. 8, págs. 504-508, 2000.
Cancer genome landscapes. B. Vogelstein en *Science*, vol. 339, págs. 1546-1558, 2013.
Life in our phage world. F. Rohwer et al. Wholon, 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

La secuencia nucleotídica de un ADN vírico. John C. Fiddes en *IyC*, febrero de 1978.
Un interruptor genético en un virus bacteriano. M. Ptashne, A. D. Johnson y C. O. Pabo en *IyC*, enero de 1983.
Activadores génicos. M. Ptashne en *IyC*, marzo de 1989.
Intercambio de genes bacterianos en la naturaleza. R. V. Miller en *IyC*, marzo de 1998.

por Pere Castells

Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es coordinador del proyecto UB-Bullifoundation.



El nitrógeno líquido en la cocina

De la industria, pasando por los restaurantes, llega ahora a los *cáterings*

Una de las claves de la tecnificación de la cocina actual radica en utilizar algunos de los productos y procesos que emplea la industria alimentaria. Pensemos en el provecho que se ha sacado de toda la experiencia industrial en el campo de los texturizantes y los aromatizantes, o en la cocción a bajas temperaturas controladas.

Pero uno de los iconos de esta revolución han sido los productos procedentes de la industria de la congelación, como el hielo seco (dióxido de carbono en estado sólido) y, sobre todo, el nitrógeno líquido, una sustancia inerte que, al evaporarse a temperatura ambiente, no deja rastro. Con un punto de ebullición de −195,8 °C, permite el descenso rápido de la temperatura, lo que garantiza la conservación de la textura y la calidad de los alimentos. Es uno de los productos utilizados en la congelación a muy bajas temperaturas (criogenia).

En 1922, Clarence Birdseye fundó la compañía Birdseye Seafoods. Sus investigaciones demostraron que los alimentos congelados rápidamente conservan mejor todas sus características organolépticas. Cuando la congelación es lenta, se producen cristales de hielo voluminosos e irregulares que destruyen las membranas celulares. Pero si la congelación es rápida, los cristales de hielo formados son muy pequeños, por lo que las membranas celulares de los alimentos se conservan mejor. La industria alimentaria pronto aplicó el nitrógeno liquido para ultracongelar sus productos.

Ya en 1894, el uso culinario del nitrógeno líquido se mencionaba en *Fancy ices*, el libro de la experta en cocina y helados Agnes Marshall. Un siglo después, los especialistas en gastronomía molecular Nicholas Kurti y Hervé This defendían en esta revista el potencial de la famosa sustancia [*véase* «Química y física de la cocina», por Nicholas Kurti y Hervé This; Investigación y Ciencia, junio de 1994]. Según los autores, el nitrógeno líquido permite obtener, de forma rápida y eficaz, helados de gran calidad: ligeros (con muchas burbujas de aire) y lisos (con cristales de hielo pequeñitos). Si bien la técnica fue divulgada por This a cocineros franceses como Michel Bras, quedó relegada a la experimentación culinaria (no se incorporó a la práctica de los restaurantes).

Heston Blumenthal, del Fat Duck, recuperó el uso del nitrógeno líquido. A partir de su colaboración con el físico de la Universidad de Bristol Peter Braham, lo utilizó inicialmente para mantener frescas las pastas hechas con mantequilla. Después, en el año 2000, obtuvo su primera espuma congelada. Y en 2003 y 2004 ya iniciaba su menú degustación con elaboraciones como el *Té verde nitro con mousse de lima*. En esa misma época, Ferran Adrià (El Bulli) y Dani García (Tragabuches) comenzaron a ofrecer en sus restaurantes respectivos *Caipiriña nitro con concentrado de estragón* y *Palomitas de aceite de oliva*.



HELADO CRUJIENTE de espuma de yogur de leche de cabra.

CORTESÍA DE JORDI GUILLEM

En el curso de verano «¿Qué puede enseñar la ciencia a la cocina?», organizado por la Universidad de Murcia en septiembre de 2004, García presentó numerosos ejemplos de esta técnica. A finales del mismo año publicaba el libro *Técnica y contrastes*, dedicado en buena parte a elaboraciones obtenidas mediante nitrógeno líquido. Demostraciones semejantes fueron habituales en congresos gastronómicos. También se han organizado concursos de helados, como los promovidos por Davide Cassi, profesor de física de la Universidad de Parma y experto en ciencia y cocina.

Pero el gran salto de este producto al mundo gastronómico se ha producido con la agilización de su mercado. Tras un titubeo inicial (no tenían entre sus clientes a los cocineros), las empresas de distribución se dieron cuenta de que podía ser un negocio emergente. Y así ha sido. Hoy en día es muy fácil obtener nitrógeno líquido y preparar elaboraciones delante del comensal, debido a la velocidad a la que se enfrían los alimentos.

Se ha convertido en un producto popular en la preparación de cócteles (permite enfriar rápidamente utensilios y congelar ingredientes alcohólicos). Y se usa en directo incluso en acontecimientos multitudinarios como bodas (la escenografía generada por la evaporación del gas de nitrógeno resulta espectacular).

La problemática inicial asociada a la peligrosidad que entraña trabajar a tan bajas temperaturas ha generado una gran oferta formativa, que ha sido seguida estrictamente por el sector culinario.

El nitrógeno líquido sigue generando nuevas recetas y negocios. Uno de los más recientes es el de Marios Gerakis, que el año pasado abrió en Bérgamo la heladería Al d. Mangiami, donde enfría solo con nitrógeno líquido. Con ello reivindica el sabor del producto artesanal y promueve la sostenibilidad debido al ahorro energético, el bajo consumo de agua y la minimización de residuos.



ETOLOGÍA

La sabiduría colectiva de las hormigas

Las colonias de hormigas llevan a cabo tareas complejas sin necesidad de un líder. Saber cómo se las apañan ayudaría a entender mejor otros sistemas carentes de gobierno, como el cerebro o Internet

Deborah M. Gordon

Hank Pym es uno de los personajes de *Ant-Man*, uno de los taquillazos estivales de 2015. Este científico idea un traje que reduce a un hombre al tamaño de un insecto y asegura que las hormigas son capaces de realizar hazañas increíbles, pero precisan de un líder que las dirija. Con la ayuda de un pequeño dispositivo detrás de la oreja les ordena que formen una falange de combate, con la que ayudarán a este minúsculo héroe humano a derrotar a un genio malvado.

La idea de que las hormigas tienen comandantes que imparten órdenes y dirigen sus actividades suena bien porque muchas organizaciones humanas se rigen por una jerarquía y porque es conveniente para las películas de Hollywood, donde los héroes son personas. La única pega es que resulta errónea. Las hormigas nunca marchan al paso, ni obedecen una orden al unísono. En el mundo real, la actividad aparentemente torpe y caprichosa de cada hormiga, que no parece responder a un objetivo común, se aúna con la de las demás y permite que la colonia encuentre y recolecte alimento, excave el hormiguero, abra sendas y levante puentes, proteja las plantas hospedadoras de los herbívoros y cultive huertos, todo ello sin supervisión. No necesitan un jefe, y ninguna hormiga le ordenará jamás a otra lo que ha de hacer.

Los hormigueros no son los únicos sistemas de la naturaleza que carecen de control centralizado. El comportamiento colectivo, sin órdenes superiores, existe por doquier, como la bandada de estorninos que revolotea en el cielo, la red de neuronas que le permite a usted leer esta frase o las moléculas que trabajan con los genes para sintetizar las proteínas. Tal diversidad de conductas es posible gracias a interacciones simples entre los actores, ya sean hormigas, pájaros, neuronas o moléculas.

Cuando empecé a estudiar los sistemas sin centro de control en mi doctorado, busqué uno en que las interacciones fueran fáciles de observar. Y ahí estaban las hormigas, con más de



14.000 especies repartidas por todos los hábitats terrestres del planeta. Estos insectos sociales instalan sus nidos en el suelo, en ramas huecas y hasta en bellotas, debajo de las piedras o en el follaje del dosel arbóreo de la selva. Néctar, hongos u otros insectos son una muestra de lo variado que llega a ser su alimento. Su nexo común es el comportamiento colectivo, por lo que constituyen un excelente modelo para conocer la evolución de este y su papel en la resolución de los problemas ecológicos que afrontan sus comunidades.

Mis investigaciones sobre varias especies de hormigas en ecosistemas dispares, desde el desierto hasta la selva tropical, demuestran que cada especie recurre a las interacciones con fines distintos; bien para acelerar la actividad, moderarla o mantenerla en marcha. Ello sugiere una concordancia entre la situación ecológica y la manera en que las interacciones simples modulan el comportamiento colectivo. Tal vez la evolución haya convergido hasta crear una gama de sistemas descentralizados que generan algoritmos similares para lidiar con problemas ambientales semejantes.

ALEX WILD

INTERACCIONES SIMPLES

Todas las especies de hormigas poseen atributos comunes, como son las semejanzas en la manera de llevar a cabo las tareas. Viven en colonias formadas por una legión de obreras estériles (las que usted verá corretear) y una o varias hembras fértiles, o reinas, que siempre permanecen en el hormiguero. A pesar de su nombre, ninguna ostenta poder político alguno; todo lo que hacen es poner huevos. Ni la reina ni ninguna otra hormiga deciden lo que hay que hacer ni dan órdenes a las demás. Por otro lado, todas poseen un agudo sentido del olfato, capaz de distinguir cientos de compuestos. Las hormigas huelen por las antenas: cuando una palpa a otra con ellas, husmea la capa grasa exterior formada por los llamados hidrocarburos cuticulares, que impide la deshidratación. Sabemos que, en ciertas especies, la composición de esos hidrocarburos obedece a las condiciones ambientales. La recolectora que se aventura bajo el tórrido sol del desierto en busca de alimento desprende un olor distinto de la que pasa casi todo el tiempo en el hormiguero. Como resultado, el olor de cada hormiga es el reflejo de su labor.

Para saber cómo usan las hormigas los contactos con las antenas efectuamos, junto con Michael Greene, de la Universidad de Colorado en Denver, una serie de experimentos en los que recubrimos pequeñas perlas de vidrio con los extractos de hidrocarburos cuticulares de hormigas que desempeñaban tareas concretas. Luego introdujimos las perlas en hormigueros. Comprobamos que cuando una hormiga palpa a otra con las



Deborah M. Gordon es bióloga de la Universidad Stanford. Sus investigaciones se centran en el comportamiento colectivo de las hormigas.

antenas, el mensaje que recibe es, simplemente, que ha encontrado una compañera con ese olor. Sucede que el ritmo de esos contactos es la clave que decanta la respuesta del insecto. En esos experimentos logramos modificar el comportamiento de la colonia al cambiar la frecuencia de los encuentros de sus habitantes con las perlas.

¿Cómo organizan el trabajo las colonias de hormigas con esas simples interacciones olfativas? Durante los últimos 30 años he estudiado las hormigas cosechadoras del sudeste de los Estados Unidos. En su caso, el ahorro de agua parece haber sido el factor determinante que ha condicionado el proceso de interacciones que regula la búsqueda de alimento. Las hormigas cosechadoras subsisten gracias a las semillas de gramíneas y de plantas anuales, que son su fuente de alimento y agua. Pero para conseguir el líquido elemento, es preciso gastar una parte de él. Solo permanecer afuera buscando semillas ya supone una pérdida de agua corporal. Las obreras dispuestas a salir no lo harán hasta que hayan tenido el suficiente número de encuentros con otras compañeras que regresan con alimento. Puesto que no cesan de buscar hasta dar con una semilla, la retroalimentación de las congéneres que regresan vincula la actividad recolectora con la abundancia de alimento: a mayor abundancia, menor tiempo de búsqueda, regreso más rápido al hormiguero y mayor número de recolectoras en el campo.

Mi dilatado estudio de un grupo de colonias de cosechadoras ha permitido saber de qué modo la evolución modela su comportamiento colectivo. Para entender cómo está actuando la selección natural en este preciso momento, es necesario averiguar si la manera en que el hormiguero regula la actividad recolectora influye en su capacidad para fundar nuevas colonias. El primer paso consistió en saber qué hormigueros eran descendientes de otros. Nadie los había clasificado así hasta entonces. Desde 1985 he estado siguiendo una población de alrededor de 300 colonias en un lugar del sudeste de Arizona. Cada año voy y busco las colonias del año anterior, me despido de las que han desaparecido y marco las nuevas en el mapa. Los datos muestran que una colonia perdura entre 25 y 30 años. Todos los años los efímeros machos se congregan para aparearse en un encuentro multitudinario con las reinas vírgenes provenientes de todas las colonias de la población. Consumado el apareamiento, los machos mueren y las reinas se dispersan volando para fundar colonias nuevas. Cada reina engendrará cada año una nueva legión de obreras estériles mientras viva, todas con el esperma obtenido en ese único encuentro amoroso. Y cuando la colonia sea lo bastante numerosa, engendrará hembras y machos fértiles. A partir del ADN de 250 hormigueros, junto con Krista Ingram, de la Universidad de Colgate, y Anna Pilko, de la Universidad de California en San Diego, determinamos la ascendencia de las colonias hijas y averiguamos así cómo influye la actividad recolectora de cada colonia madre en su éxito reproductor.

Descubrimos que las colonias que fundan nuevos hormigueros suelen ser las que ahorran agua reduciendo la recolección de alimento en los días secos y calurosos; sacrifican, pues, parte de la comida para conservar el agua. Este resultado nos sorprendió, porque muchos estudios zoológicos dan por supuesto que cuanta más comida se consiga, mejor. Para mi asombro, las colonias que durante años consideré precarias por no recolectar demasiado cuando el tiempo era seco y caluroso, acabaron siendo bisabuelas, mientras que las más industriosas, las que recolectaban con afán un día tras otro, no lograron prosperar y multiplicarse. Las semillas almacenadas se conservan largo tiempo, por lo que el cese de la recolección algún día no afecta a la supervivencia.

La selección natural actúa sobre rasgos que son heredables de generación en generación, y hay indicios intrigantes de que el comportamiento colectivo de las hormigas cosechadoras lo es: las colonias hijas semejan a las fundadoras en la manera de reducir la recolección en ciertos días. En definitiva, hasta donde sé, nuestros hallazgos constituyen la primera prueba de evolución actual del comportamiento colectivo en una población de fauna silvestre.

SOLUCIONES ECOLÓGICAS

Las diversas especies de hormigas demuestran que el régimen de interacciones propio de cada una depende de las condiciones ecológicas. También estoy estudiando las hormigas arborícolas del género *Cephalotes*, de la selva de México occidental. En los trópicos, el aire es muy húmedo y la comida abundante, por lo que la recolección no es tan penosa como en el desierto. Pero en cambio, la competencia es tenaz; muchas otras especies de hormigas explotan los mismos recursos. Descubrí que las *Cephalotes* crean sendas de recolección en los árboles que unen los hormigueros con las fuentes de alimento y por las que transitan sin cesar. A diferencia de las cosechadoras, prosiguen con sus quehaceres a menos que las interacciones les hagan cesarlos o moderarlos. Por ejemplo, detienen su actividad si tropiezan con individuos de otras especies. Un solo individuo de *Pseudomyrmex* interpuesto en una ramita puede amedrentar a las más robustas pero menos decididas *Cephalotes*, que dejarán de lado la rama en su itinerario. Es tal su afán por mantener el tránsito de individuos por la senda cuando todo está despejado y en reanudarlo cuando el peligro ha pasado, que quizá lo más fácil es evitar cualquier conflicto.

Las interacciones simples entre las hormigas *Cephalotes* han creado una red de itinerarios entre el denso follaje del dosel arbóreo. Y las interacciones confieren resiliencia y flexibilidad a la red. Cada hormiga marca a su paso la ruta con una feromona y sigue el rastro de las que la han precedido. Junto con Saket Navlakha, del Instituto Salk de Estudios Biológicos, estamos trabajando para descifrar el algoritmo que usan para mantener y reparar los senderos. Cuando una obrera llega a una bifurcación, en una ramita, tallo, enredadera o cualquier otro

EN SÍNTESIS

Las colonias de hormigas no son gobernadas por ningún líder. Organizan las actividades mediante interacciones simples basadas en señales olfativas.

El sistema de interacciones que rige en cada hormiguero depende de las condiciones ecológicas.

El comportamiento colectivo de las hormigas podría esclarecer los entresijos de otros sistemas que operan sin centro de control.

objeto, suele tomar la senda que desprende un olor más intenso a feromona, puesto que es la que han tomado más compañeras recientemente. Pero a menudo sucede que un puente delgado entre dos tallos cae por el viento, se hunde por el paso de una lagartija o el quiebre de una rama podrida o, en ocasiones, por el corte deliberado de mis tijeras. El obstáculo no las detiene por mucho tiempo: si el camino queda cortado, retroceden hasta la intersección más próxima y buscan la feromona desde allí, hasta que abren un desvío que enlaza con el otro lado.

El comportamiento colectivo de las hormigas ha evolucionado en respuesta a la distribución de los recursos en el hábitat, pero también a los costes de la recolección y al comportamiento de otras semejantes con las que conviven. Algunos recursos están concentrados en una sola zona, mientras que otros están dispersos al azar. Las hormigas de ciertas especies destacan en la explotación de recursos que se hallan concentrados, como los restos de un pícnic. Dejan señales de feromonas para que sus compañeras puedan seguirlas y eso acaba formando caminos de reclutamiento. El reclutamiento tiene sentido cuando los recursos están agregados, pues donde hay bocadillos es probable que también haya galletas. En cambio, las especies que buscan recursos dispersos, como las semillas, no recurren a él porque encontrar una semilla no garantiza que haya otra cerca.

La búsqueda de alimento exige ante todo un comportamiento colectivo especializado. Puesto que su sentido más agudo es el olfato, las hormigas han de acercarse a la comida para dar con ella. Cuanto más amplio sea el abanico de lugares donde pueda haber, mayor será el área que tendrán que abarcar. Pero cuantos más sean los lugares donde pueda estar oculta, más minuciosamente habrá que peinar el terreno. He observado que las hormigas argentinas resuelven ese compromiso a la perfección optando por uno u otro itinerario según el número de efectivos (o densidad de individuos). Cuando concurren pocas obreras en un espacio pequeño, todas siguen un camino sinuoso, que permite a cada una escudriñar su zona a conciencia. En cambio, cuando coinciden pocas en un espacio amplio, trazan caminos más rectos; así abarcan más terreno entre todas. Las obreras podrían percibir la densidad de efectivos a través de una señal simple: el número de encuentros con otras. Cuantos más contactos con las antenas, más tortuoso será el itinerario. La hormiga argentina ha invadido las regiones de clima mediterráneo de todo el mundo. Quizá sea esa efectividad en hallar nuevas fuentes de alimento lo que explique en buena parte su gran éxito en la competencia entablada con las especies autóctonas.

LAS LECCIONES DE LAS HORMIGAS

La manera en que las hormigas usan las interacciones simples para prosperar en hábitats singulares podría sugerir soluciones a problemas que se presentan en otros sistemas. Junto con el informático Balaji Prabhakar, de la Universidad Stanford, reparamos en que, para regular la recolección, las hormigas cosechadoras recurren a un algoritmo similar al del Protocolo de Control de Transmisión/Protocolo de Internet (TCP/IP), usado para regular el tráfico de datos en Internet. A esta analogía la hemos llamado «Anternet» [del inglés *Ant*, hormiga]. El TCP-IP se diseñó en un entorno de altos costes operativos: al principio Internet era tan pequeña que había poca redundancia, por lo que era crucial evitar que algún paquete de datos se extraviase. De igual modo que una recolectora no volverá a salir hasta que no entable el suficiente número de encuentros con las compañeras que regresan con comida, un paquete de datos no abandonará el ordenador de origen a menos que reciba la confirmación del rúter de que el paquete previo dispone del ancho de banda necesario para llegar a su destino. Es probable que en sus 130 millones de años de evolución las hormigas hayan creado muchos otros algoritmos que el ser humano no ha concebido aún. Tal vez su aplicación a las redes de datos humanas permitiría organizarlas con interacciones simples, que requieren una información mínima.

Estoy convencida de que muchos otros tipos de comportamiento colectivo esconden ejemplos de algoritmos adaptados a la situación ecológica. Por ejemplo, el cáncer muta para adaptarse a las condiciones de su microambiente local. Un tumor que suele hacer metástasis en un tejido concreto probablemente ha evolucionado para usar recursos concentrados en dicho tejido. Es posible que ese tipo de tumores, como las hormigas que han aprendido a explotar recursos agregados, sean los más proclives a enviar células de vuelta al tumor primario o a reclutar más células, tal y como sucede en el cáncer de mama. En ese caso, las células que reclutan a otras según los recursos agregados serían las mejores dianas para cebos tóxicos.

En numerosos campos de la biología y la ingeniería se ha desatado un gran interés por el papel de las interacciones simples en el comportamiento colectivo. Cada vez está más claro que tales interacciones están en sintonía con las condiciones cambiantes. El campo de la biología de sistemas, fundamentado en un siglo de trabajos que detallan con primor lo que sucede en el seno de la célula, dirige ahora su atención hacia las interacciones entre las células, con la ayuda de los grandes avances en las técnicas de toma de imágenes. En neurociencia, las nuevas técnicas permiten filmar las secuencias de activación de miles de neuronas y hallar pautas en ellas. La especie humana puede ver ciertos tipos de movimiento y oír ciertos tipos de sonidos porque los circuitos neuronales han evolucionado para responder de manera conjunta a características del entorno. Por ejemplo, la rapidez con la que objetos cruciales como los progenitores o los depredadores acostumbran a moverse, o la gama de frecuencias que es más importante poder escuchar. Los sistemas de ingeniería también evolucionan: el crecimiento vertiginoso de Internet y del número de dispositivos conectados a ella, así como de la velocidad de las interacciones, demanda soluciones nuevas y descentralizadas.

Ahora estamos preparados para buscar tendencias en las maneras en que diferentes sistemas naturales han desarrollado un comportamiento colectivo afín para afrontar retos ecológicos similares. Quizá seamos capaces de aplicar este conocimiento en procesos que operan sin un control central y resolver algunos de los problemas que afectan a nuestra sociedad. IyC

PARA SABER MÁS

Ant encounters. Deborah M. Gordon. Princeton University Press, 2010.
The ecology of collective behavior. Deborah M. Gordon en *PLOS Biology*, vol. 12, n.º 3, art. e1001805, marzo de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

La inteligencia colectiva. Así buscan las hormigas su alimento y organizan su nido. Guy Théraulaz, Eric Bonabeau, Simon Goss y Jean-L. Deneubourg, en *IyC*, mayo de 1995.
Enjambres inteligentes. Eric Bonabeau y Guy Théraulaz en *IyC*, mayo de 2000.
Toma de decisiones en enjambres. Thomas D. Seeley, P. Kirk Visscher y Kevin M. Passino, en *IyC*, septiembre de 2006.

FILOSOFÍA DE LA CIENCIA

Los límites del méto científic



Un debate reciente sobre la viabilidad de la teoría de cuerdas ha puesto en primer plano una cuestión fundamental: ¿necesitamos una nueva caracterización del método científico?

Adán Sus

Adán Sus es físico y profesor del departamento de filosofía de la Universidad de Valladolid. Sus investigaciones se centran en la filosofía de la física.



¿QUÉ HACE QUE UNA TEORÍA SEA CONSIDERADA PROPIAMENTE CIENTÍFICA EN lugar de mera especulación? ¿Qué criterios usan los científicos para depositar su confianza en una teoría en lugar de en otra? Aunque estas preguntas están implícitas en la evaluación de cualquier teoría científica, tradicionalmente han sido abordadas de forma explícita por la filosofía de la ciencia. Sin embargo, desde hace un tiempo han pasado al primer plano de una enquistada discusión entre físicos teóricos. Así al menos se desprende del actual debate en torno a si es legítima o no la adhesión de una parte de la comunidad a ciertas propuestas que, como la teoría de cuerdas o la hipótesis del multiverso, no pueden ser comprobadas empíricamente o, al menos, no con los medios técnicos actuales.

En su reciente libro *String theory and the scientific method* (Cambridge University Press, 2013), el físico y filósofo de la ciencia Richard Dawid, de la Universidad de Viena, defiende la existencia de una serie de criterios que permitirían evaluar la viabilidad de una teoría más allá de su pura confirmación empírica. Para Dawid, el empleo de tales argumentos constituye una buena práctica científica, intensificada por la naturaleza de la física de altas energías, pero legítima y —aunque en menor medida— ya usada en otros episodios de la historia de la ciencia. En el caso concreto de la teoría de cuerdas, dichos criterios legitimarían la defensa que muchos hacen ella.

Por supuesto, no todos secundan esa opinión. En un artículo muy comentado publicado en *Nature* en 2014, George Ellis, cosmólogo de la Universidad de Ciudad del Cabo, y Joe Silk, investigador del Instituto de Astrofísica de París, argumentaban que, con la teoría de cuerdas, la física se está alejando peligrosamente de uno de sus pilares metodológicos fundamentales: el requisito de confirmación empírica. Esta valoración de Ellis y Silk, así como otras duras críticas lanzadas contra la teoría de cuerdas, son hoy compartidas por numerosos físicos y filósofos.

El debate no es nuevo, pero en fecha reciente parece haber arreciado. En parte como consecuencia del libro de Dawid y del artículo de Ellis y Silk, el pasado mes de diciembre un congreso reunió en Múnich a físicos y filósofos para tratar la cuestión. La polémica hunde sus raíces en algo tan básico como qué entendemos por ciencia. Para unos, defender teorías que no se prestan a la confirmación empírica puede llegar a poner en peligro la integridad de la ciencia en su conjunto. Para otros, la situación anuncia un cambio revolucionario: la necesidad de redefinir el método científico.

La teoría de cuerdas es una teoría científica con un altísimo grado de complejidad matemática. Pretende proporcionar una descripción unificada de todas las partículas e interacciones fundamentales a partir de ciertas entidades microscópicas extensas («cuerdas») y sus modos de vibración. Quienes se dedican a ella muestran un alto grado de confianza en su teoría; si no completa, la consideran seguramente la más ambiciosa y con mayores probabilidades de éxito de la física fundamental. Ello se debe, en gran parte, a que promete solucionar la aparente incompatibilidad de las dos teorías que dominaron la física del siglo XX: la mecánica cuántica y la relatividad general de Einstein. Con

EN SÍNTESIS

La teoría de cuerdas y otras áreas de la física teórica moderna hacen predicciones que, al menos con los medios técnicos actuales, no pueden ponerse a prueba mediante ningún experimento.

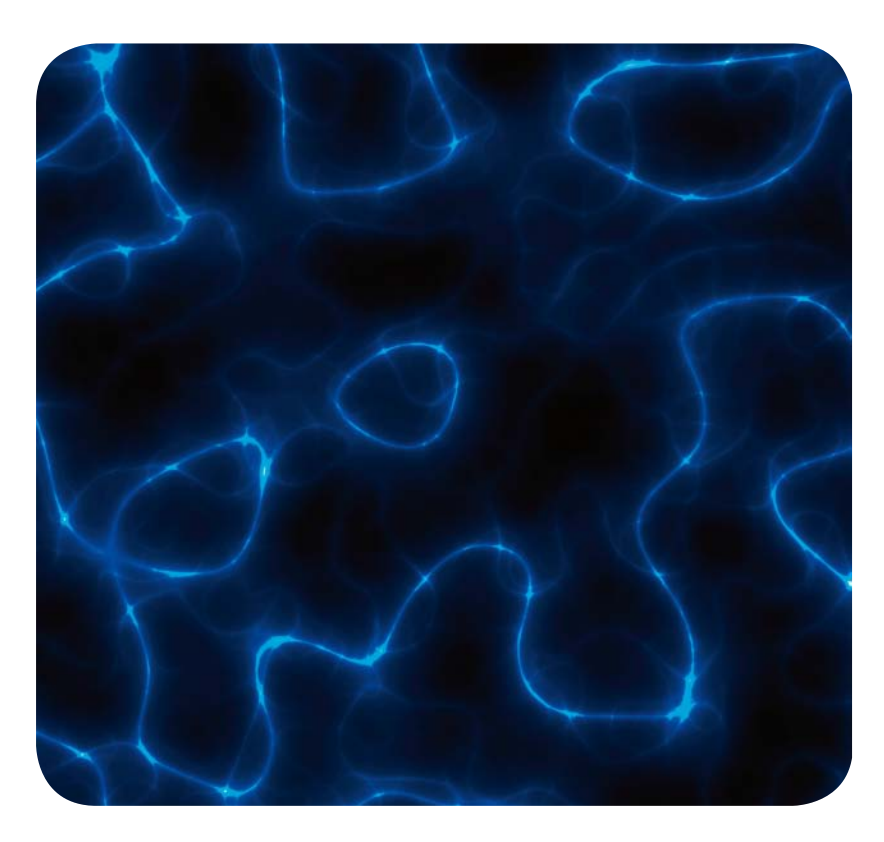
Esa situación ha sido objeto de numerosas críticas. Para muchos físicos y filósofos, exonerar a una teoría física del requisito de verificación empírica supone abandonar el ámbito de la ciencia.

Por su parte, los partidarios de la teoría esgrimen a su favor algunas cualidades intrínsecas, como su enorme potencial explicativo o la falta de alternativas para formular una «teoría del todo».

Una nueva propuesta surgida en el ámbito de la filosofía de la ciencia ha defendido la legitimidad de esos argumentos no empíricos. Su validez implicaría la necesidad de redefinir el método científico.

PÁGINAS ANTERIORES: *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

UN POSTULADO SENCILLO: La teoría de cuerdas parte de la suposición de que las diferentes partículas elementales son, en realidad, diminutas entidades unidimensionales. Sus distintos modos de vibración darían lugar a lo que a grandes distancias percibimos como partículas elementales de uno u otro tipo. Uno de esos modos exhibe, además, todas las propiedades del gravitón, el supuesto cuanto de la interacción gravitatoria.



tales credenciales, puede resultar sorprendente descubrir que la teoría de cuerdas no se encuentra confirmada experimentalmente, o, más aún, que se afirme que ni siquiera hace predicciones empíricas.

Esta última crítica abarca dos aspectos, uno más preocupante que el otro. En primer lugar, la mayoría de las predicciones de la teoría de cuerdas afectan a escalas de energía que se encuentran extraordinariamente lejos de las que pueden sondear los medios técnicos actuales; escalas que, de hecho, tal vez permanezcan para siempre inaccesibles al ser humano. Por ejemplo, la extensión finita de las cuerdas solo tendría efectos directamente observables a la escala de Planck, unos mil billones (10^{15}) de veces más que la energía de los experimentos que actualmente lleva a cabo el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN. Pero, aún peor, algunas implicaciones de la teoría podrían hacerla incontrastable no solo en la práctica, sino también en principio. Esto último guarda relación con el hecho de que la teoría de cuerdas predice un inmenso «paisaje» de estados fundamentales, los cuales se corresponderían con un número casi inconcebible de universos posibles.

Ante esta situación, los críticos, cuyo número ha ido en aumento durante los últimos años, no se limitan a cuestionar la teoría en sí —una actividad consustancial a la ciencia—, sino que ponen en duda su estatus de teoría científica legítima. Impugnan la legitimidad de los argumentos que se esgrimen en su defensa y, de manera implícita, cuestionan que los criterios con los que se evalúa la teoría de cuerdas sean los adecuados para calibrar la idoneidad de una teoría científica.

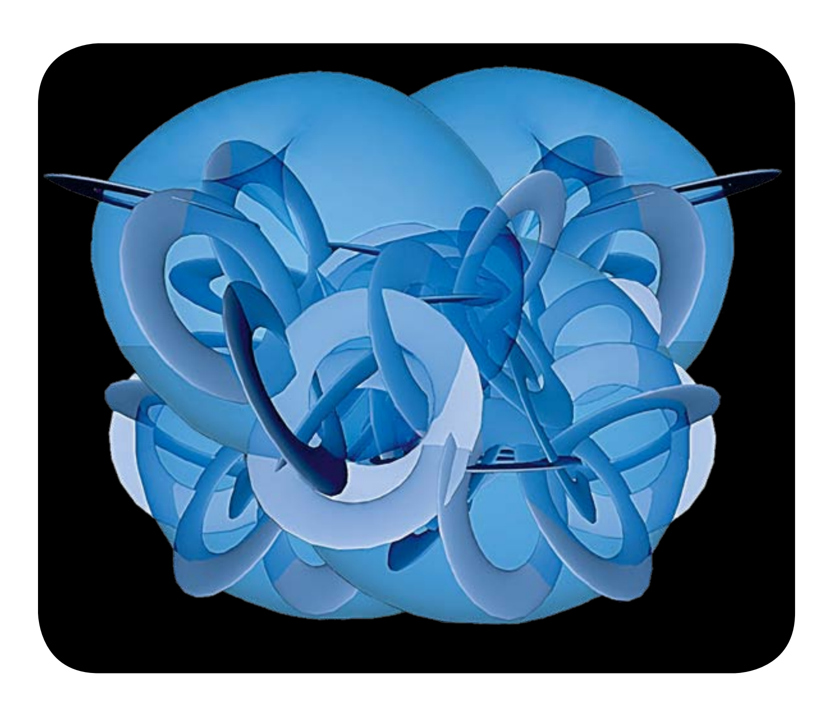
Como cabe imaginar, una acusación semejante resulta extremadamente grave para cualquier teoría. Tanto que puede llevar a pensar en la necesidad de un cambio en la concepción misma de lo que entendemos por ciencia. Muy grave, sí, pero quizá no tan inusual en la historia de la física.

POPPER Y EL PROBLEMA DE LA DEMARCACIÓN

Para entender bien la disputa, hemos de recordar lo que gran parte de los científicos actuales y, de manera más matizada, numerosos filósofos de la ciencia toman como procedimiento canónico a la hora de evaluar una teoría científica. Debemos resaltar que, según la forma habitual de entenderlo, dicho procedimiento no sería un componente más de lo que, en términos generales, podríamos denominar práctica científica. Se trataría más bien de un rasgo esencial, definitorio, de la metodología de la ciencia. En este sentido, muy a menudo es presentado como un criterio de demarcación; es decir, un requisito sin el cual una teoría no puede ser declarada científica.

Dicho modelo se encuentra fuertemente inspirado en las aportaciones realizadas en los años treinta del siglo pasado por el filósofo austríaco Karl Popper. Según este esquema, lo que caracteriza a las teorías científicas frente a otro tipo de especulaciones teóricas es su falsabilidad: su capacidad para realizar predicciones contrastables empíricamente y tales que, en caso de verse refutadas, impliquen el rechazo de la teoría. Ello nos permitiría distinguir entre teorías como la relatividad general (la cual hace predicciones experimentales, como la relativa a la precesión del perihelio de Mercurio o a la existencia de las ondas gravitacionales, detectadas recientemente) de otras como el psicoanálisis (uno de los ejemplos considerados por el mismo Popper). Aunque estas últimas puedan resultar conceptualizaciones útiles, no deben ser llamadas propiamente científicas, pues escapan al criterio de falsabilidad. Más notorio aún es el caso de las pseudociencias que aparentan ser predictivas pero que tampoco se comprometen con dicho criterio porque, bien miradas, sus predicciones no son tales.

Sin duda, el criterio de falsabilidad parece captar bien varias de las intuiciones que solemos asociar con la ciencia empírica. Pero, como el mismo Popper ya sabía, su formulación precisa no se encuentra exenta de problemas. Su lógica puede resumirse de manera sencilla: formulemos nuestras hipótesis científicas, deduzcamos sus consecuencias empíricas y, si alguna de ellas no se cumple, no tendremos más remedio que aceptar que la teoría inicial era defectuosa. Pero incluso esta formulación pone de manifiesto un problema clave a la hora de emplearlo como criterio de demarcación: en la derivación de las predicciones siempre intervienen hipótesis auxiliares, las cuales pueden ser las responsables de la predicción fallida. Es más, la historia de la ciencia nos enseña que esta «estrategia defensiva» —que, en ciertos casos, puede esconder la resistencia a aceptar las consecuencias de una predicción errada— resulta a menudo exitosa y conduce a nuevas hipótesis que tal vez se vean confirmadas



PREDICCIONES DIFÍCILES DE VERIFICAR: Por cuestiones de coherencia interna, la teoría de cuerdas requiere que el espaciotiempo tenga nueve dimensiones espaciales, en lugar de las tres a las que estamos acostumbrados. Seis de ellas formarían un subespacio diminuto cuyos detalles solo serían apreciables en experimentos de muy alta energía. Los expertos han derivado qué propiedades generales deberían satisfacer tales subespacios. La imagen muestra la proyección bidimensional de un espacio de Calabi-Yau, una de las muchas posibilidades teóricas.

ROGILBERT/WIKIMEDIA COMMONS

en el futuro. El caso de la materia oscura nos proporciona un claro ejemplo de estrategia defensiva que termina transformándose en un nuevo programa de investigación con numerosas predicciones propias. A pesar de todo, podríamos pensar que, más allá de estas sutilezas, la esencia de las teorías científicas se halla en su capacidad predictiva y que en virtud de ella han de ser evaluadas.

EL PROBLEMA DE LA CONFIRMACIÓN

Sin duda, la propuesta popperiana guarda una estrecha relación con el problema de evaluación de teorías que pone de manifiesto la discusión en torno a la teoría de cuerdas. No obstante, y aunque el filósofo austríaco goza de un gran prestigio entre los físicos, su propuesta no basta para entender en todo su alcance la cuestión relativa a la teoría de cuerdas. El obstáculo principal reside en que el criterio de falsabilidad no puede, en ningún caso, distinguir entre teorías con mayor o menor grado de confirmación.

Los supuestos problemas asociados con el poder predictivo de la teoría de cuerdas son dos, relacionados pero diferentes: por un lado, la capacidad de la teoría para realizar predicciones; por otro, nuestra capacidad para confirmarlas. Es cierto que existen aspectos de la teoría que no parecen prestarse a ninguna predicción empírica específica. La teoría de cuerdas implica la existencia de un «paisaje» de billones de universos, pero parece imposible certificar su existencia o averiguar si el nuestro es uno de ellos. Este primer problema se halla directamente relacionado con el criterio de cientificidad: si la teoría de cuerdas no fuese capaz de hacer ninguna predicción contrastable, entonces seguramente habría un consenso entre los físicos para declararla no científica. Sin embargo, no ocurre así. La teoría sí realiza predicciones, o al menos esa parece ser la percepción mayoritaria. Sin embargo, las hace a una escala de energías extremadamente alejada de la que pueden sondear nuestros medios técnicos más potentes.

Así pues, el problema no es tanto si la teoría de cuerdas constituye o no una teoría científica. La verdadera cuestión es si, a la vista de los datos empíricos de los que disponemos hoy y de los que dispondremos durante mucho tiempo, cabe justificar la confianza que numerosos físicos depositan en ella; un respaldo que lleva asociado una importante inversión económica, de esfuerzo y de talento. En otras palabras, ¿debemos creer que la teoría de cuerdas cuenta con una alta probabilidad de proporcionar una descripción adecuada de la naturaleza? ¿Debemos considerarla, en cierto sentido, o hasta cierto grado, confirmada?

Una vez más, debido al modelo de evaluación de teorías que solemos dar por supuesto, puede que nuestra intuición nos lleve a responder inicialmente de manera negativa. Según dicho modelo, la única confirmación válida en el contexto científico es la empírica. O, expresado de otro modo, cuantas más predicciones empíricas (novedosas) se vean corroboradas por los experimentos, mayor será el grado de confirmación de una teoría. Sin embargo, ahora lo capital ya no es cómo delimitar la ciencia de otros ámbitos, sino clarificar cuáles son los mecanismos que nos permiten calibrar hasta qué punto podemos considerar confirmada una teoría física.

Es aquí donde entra la propuesta de Dawid. Este autor sostiene que, para entender el debate entre partidarios y detractores de la teoría de cuerdas, hemos de tener en cuenta que los primeros emplean una serie de criterios de evaluación que los segundos no están dispuestos a aceptar; tal vez por no ser conscientes de que se ha producido un cambio en dichos criterios o, al menos, en la importancia relativa que se concede a algunos de ellos. Esto último no debería extrañarnos si tenemos en cuenta que, al fin y al cabo, nada impide que los criterios con que se evalúa una teoría experimenten una evolución histórica; más aún cuando, desde la segunda mitad del siglo xx, la física de partículas ha situado en un primer plano ciertos rasgos vinculados a la validez de las teorías que no pueden identificarse directamente con la confirmación empírica.

PROPIEDADES INTRÍNSECAS

Pero ¿existen indicios sobre la viabilidad de una teoría física más allá de su grado de confirmación empírica? ¿De qué naturaleza son? ¿Qué fiabilidad tienen? Tales preguntas desempeñan un papel central en el trabajo de Dawid. Para enfrentarse a ellas, conviene primero acercarse a un modelo de confirmación empírica que, en las últimas décadas, ha cobrado gran auge en la filosofía de la ciencia: el bayesianismo.

La idea principal del bayesianismo puede describirse de manera simple. Supongamos que somos capaces de asignar una probabilidad a una hipótesis científica (esto puede interpretarse como una medida del grado de confianza que un sujeto racional debería depositar, a la luz de las pruebas empíricas disponibles, en la corrección de la teoría). Una vez asignada dicha probabilidad, podemos preguntarnos cómo cambiará a medida que se vayan confirmando las predicciones de la teoría. Pues bien, existe

un teorema en teoría de la probabilidad, el teorema de Bayes, el cual demuestra que, si una predicción se deduce de una hipótesis, la probabilidad de que la hipótesis sea correcta aumentará a medida que se vayan cumpliendo las predicciones.

Esto último puede entenderse como una formalización del modelo usual de evaluación de teorías, o, como lo llama Dawid, del paradigma científico clásico: las predicciones empíricas cumplidas, y solo ellas, confirman las teorías en el sentido de que incrementan la probabilidad de que resulten correctas.

Pero ¿es eso lo único que cuenta? Según Dawid, la misma perspectiva bayesiana puede emplearse para ir más allá de la confirmación empírica. Pensemos en una teoría, como la teoría de cuerdas, la cual no podemos confirmar empíricamente porque, por una razón u otra, no hace predicciones que podamos poner a prueba en un experimento. ¿Cómo proceden los físicos para evaluar su idoneidad? Sin duda, si por confirmación nos ceñimos a la verificación empírica de sus predicciones, esta nunca podrá exhibirse como uno de sus méritos. Pero ¿hay otros rasgos que podamos tomar por favorables?

Si examinamos los argumentos que esgrimen los defensores de la teoría de cuerdas, veremos que, a menudo, estos tienden a presentar como virtudes algunas de sus propiedades teóricas. Por ejemplo, es habitual encontrar alegatos basados en las supuestas cualidades estéticas de la teoría, como su simplicidad o belleza, así como otros de carácter lógico, como su consistencia interna. Con respecto a estos últimos, hemos de reconocer que se trata de requisitos mínimos que debe cumplir cualquier teoría, pero que no pueden servir para evaluarlas positivamente. En cuanto a las propiedades estéticas, la cuestión es más resbaladiza. Existen ejemplos notables en la historia de la física —Einstein tal vez sea el más destacado— de investigadores que admitieron que los criterios estéticos ejercieron una influencia notable en algún momento de su carrera. No obstante, resulta difícil dejar de lado las connotaciones subjetivas que acompañan a tales apreciaciones y pensar que estas puedan llegar a ser relevantes en la evaluación de una teoría (no digamos ya si pretendemos que adquieran un estatus mínimamente cercano al de la confirmación empírica).

En definitiva, en el seno del paradigma clásico de evaluación de teorías, se asume que los criterios estéticos o lógicos pueden, como mucho, resultar útiles en el proceso de formulación de hipótesis, pero no en el de su justificación. Es decir, no pueden usarse para confirmar en mayor o menor grado una teoría.

EVALUACIÓN NO EMPÍRICA

Pero las propiedades estéticas o la consistencia interna no son las únicas razones que esgrimen los físicos de cuerdas para evaluar positivamente su teoría. En primer lugar, la teoría de cuerdas es, según sus defensores, el único proyecto actual que promete la unificación de todas las interacciones conocidas, desde la gravedad hasta las fuerzas nucleares. Es cierto que existen otras propuestas que aspiran a conjugar gravedad y mecánica cuántica, como la gravedad cuántica de bucles [*véase* «Átomos del espacio y del tiempo», por Lee Smolin; Investigación y Ciencia, marzo de 2004]. Sin embargo, la teoría de cuerdas es la única conocida que aspira a convertirse en una verdadera «teoría del todo». Este primer argumento no empírico a su favor es lo que Dawid llama *argumento de la falta de alternativas*.

En general, los problemas relacionados con la búsqueda de una teoría cuántica de la gravitación se manifiestan en la aparición de cantidades infinitas en los cálculos. Esas divergencias asoman también en otras teorías, como la electrodinámica o la cromodinámica cuánticas, pero en ellas pueden eliminarse gracias a una técnica conocida como renormalización. Sin embargo, todos los intentos de aplicarla al caso del campo gravitatorio han resultado infructuosos. La teoría de cuerdas soluciona este problema al reemplazar las partículas puntuales por entidades extensas. Por un lado, uno de sus modos de vibración puede identificarse con el gravitón; por otro, el tamaño finito de las cuerdas «cura» los infinitos que, de otro modo, plagarían los cálculos. Pero, además —y aquí nos encontramos con otra virtud no empírica—, los otros modos de vibración de las cuerdas dan cabida a más partículas e interacciones, lo que convierte a la teoría en un proyecto de unificación con potencial para explicar todo tipo de resultados inesperados.

Así pues, a pesar de que una de las motivaciones iniciales para investigar la teoría de cuerdas fuera resolver las dificultades asociadas a la formulación de una teoría cuántica de la gravedad, su desarrollo posterior ha demostrado la capacidad de la teoría para ofrecer explicaciones de mucho mayor alcance, desde la



PREDICCIONES IMPOSIBLES DE VERIFICAR: La teoría de cuerdas admite un número exorbitante de soluciones para describir la geometría de las dimensiones adicionales del espacio. Cada una de ellas daría lugar a sus propias leyes físicas de baja energía, por lo que puede interpretarse como un universo posible. Con independencia de los medios técnicos al alcance del ser humano, la existencia de tales universos parece escapar a toda verificación empírica.

promesa de derivar —más que unificar— las distintas interacciones hasta la interpretación de fenómenos como la entropía de los agujeros negros. La teoría de cuerdas brinda, pues, explicaciones inesperadas, no buscadas inicialmente, de fenómenos diversos, y parece natural percibir esta cualidad como una virtud. Esta observación ha sido bautizada por Dawid como *argumento de la coherencia explicativa inesperada*.

Por último, la teoría de cuerdas puede verse como la culminación de las ideas que, en el siglo XX, condujeron a la formulación del modelo estándar, uno de los mayores logros de la física moderna. Puede argumentarse que, en sus comienzos, también este nació para resolver problemas de índole más bien técnica. Sin embargo, más adelante demostró una gran capacidad explicativa carente de rival teórico y —como los físicos se encargan de recordarnos— acabó por convertirse en la teoría mejor confirmada de la historia de la ciencia. ¿No es evidente la similitud entre ambos casos? ¿No estamos autorizados a inferir el éxito probable de nuestra teoría a partir del éxito corroborado de teorías anteriores que nacieron con las mismas virtudes teóricas? La respuesta afirmativa a esta pregunta constituye el núcleo del *argumento metainductivo a partir del éxito de teorías pasadas*.

Estos son los argumentos principales empleados por los defensores de la teoría de cuerdas. Los críticos, por su parte, tienden a no concederles ningún poder confirmatorio y enfatizan la persistente incapacidad de la teoría para ser contrastada empíricamente. La tesis central de Dawid es que tales argumentos no son circunstanciales ni obedecen a meras apreciaciones subjetivas, sino que echan mano de lo que podríamos llamar auténticos criterios de confirmación no empírica. De ser el caso, antes de que una teoría pueda ser confirmada empíricamente, los físicos estarían legitimados a evaluarla basándose en criterios puramente teóricos.

Es justamente esta pretensión la que ha puesto en guardia a un número considerable de críticos y la que ha provocado las acusaciones de acientificidad lanzadas contra la teoría. De modo que, para el defensor de la teoría de cuerdas, es urgente mostrar que los citados argumentos son buenos y señalar los principios en los que se fundamentan.

ALTERNATIVAS E INFRADETERMINACIÓN

Pensemos por un momento en los argumentos que acabamos de citar. Lo primero que destaca es que los tres son de naturaleza distinta. El primero supone que la no existencia de alternativas constituye un indicador de la bondad de la teoría; el segundo pone énfasis en una característica teórica más bien intrínseca, la capacidad explicativa; el tercero infiere por inducción las posibilidades de éxito de una teoría a partir del éxito de teorías pasadas. Tomados de uno en uno, no parecen tener excesiva fuerza. ¿Qué nos hace suponer, por ejemplo, que la falta de alternativas no se deba a la poca habilidad o imaginación de los físicos? ¿Cuántas teorías pasadas que se creyeron altamente explicativas resultaron ser incorrectas?

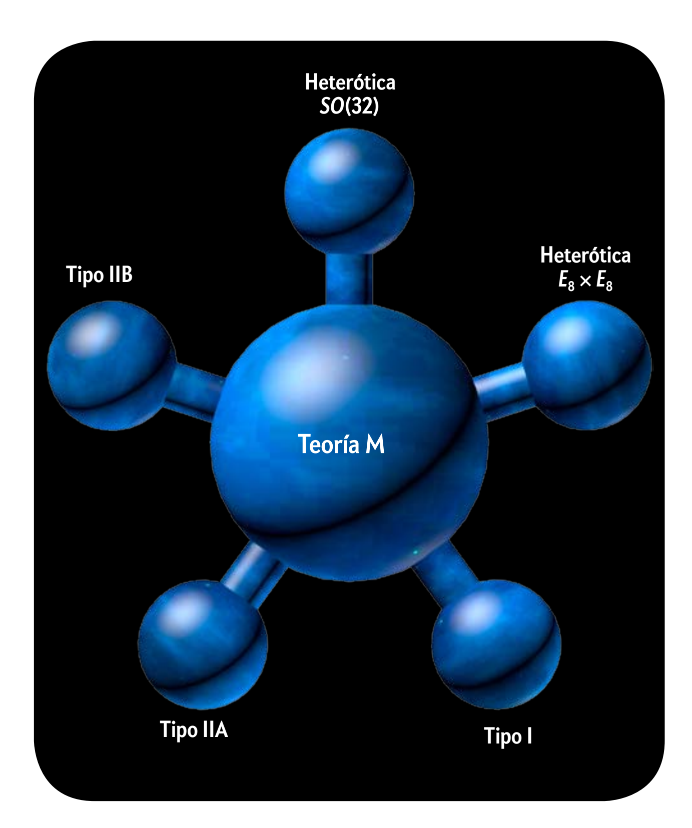
El criterio de falsabilidad de Popper no puede, en ningún caso, distinguir entre teorías con mayor o menor grado de confirmación

La originalidad de la aportación de Dawid no consiste en usar estos argumentos para defender la teoría de cuerdas —algo que sus partidarios llevan tiempo haciendo—, sino en señalar que apuntan a una especie de propiedad «oculta» de las teorías cuya existencia sería lo que les otorgaría validez. Es decir, lo que hacen los argumentos es destacar ciertos rasgos de las teorías como indicios de una situación que puede considerarse confirmatoria.

Analicemos esta conclusión con cuidado. El primer argumento solo funciona si la falta de alternativas teóricas indica la imposibilidad de que existan. Si la ausencia de alternativas es, digamos, contingente, debida a la falta de imaginación de los físicos, esta nunca podría ser tomada como una auténtica virtud. El argumento basado en la capacidad explicativa también establecerá la viabilidad de la teoría en la medida en que no haya otras explicaciones de los mismos fenómenos que resulten mejores, más completas o más abarcadoras. Así pues, vemos que la bondad de ambos argumentos descansa en un presupuesto común: que el número de teorías capaces de dar cuenta de un mismo abanico de fenómenos sea mínimo. Solo si la



EXPLICACIONES INESPERADAS: Aunque inicialmente desarrollada por su capacidad para conjugar gravedad y mecánica cuántica, la teoría de cuerdas ha demostrado un gran potencial para explicar otros fenómenos que hasta el momento se han resistido a los investigadores; entre ellos, los grados de libertad microscópicos que darían cuenta de la entropía de los agujeros negros.



¿HAY ALTERNATIVAS? Sus defensores argumentan que la teoría de cuerdas es la única conocida con potencial para convertirse en una verdadera «teoría del todo». Esa imagen cobró fuerza en los años noventa, cuando se observó que las cinco teorías de cuerdas conocidas (*ramificaciones*) estaban relacionadas entre sí mediante «dualidades», o equivalencias matemáticas. Hoy se cree que las distintas teorías de cuerdas no son más que casos particulares de una única teoría subyacente, conocida popularmente como teoría M. Su formulación, sin embargo, dista mucho de estar completa.

falta de alternativas y la capacidad explicativa son indicadores de la existencia de un número muy bajo de teorías cuyas predicciones coinciden, podremos tomarlos como auténticas virtudes teóricas que justifiquen nuestra confianza en la teoría y, siguiendo la lógica bayesiana, como confirmatorios.

En jerga filosófica, el hecho de que los datos empíricos nunca determinan por completo un modelo teórico que dé cuenta de ellos recibe el nombre de infradeterminación de la teoría. Como hemos visto, los dos primeros argumentos de Dawid presuponen una infradeterminación nula, o muy baja, de la teoría en cuestión. De hecho, la baja infradeterminación es también un presupuesto implícito en el criterio de confirmación empírica (ya que, si existe un gran número de teorías que predicen los mismos datos, no podremos afirmar que estos confirmen más una que otra). Pero ¿qué nos legitima a aceptar dicho presupuesto en ausencia de confirmación empírica? ¿No es precisamente la cuestión de si los citados rasgos constituyen virtudes teóricas independientes lo que está en juego?

Es aquí donde Dawid recurre al tercer argumento: la observación de que, en el pasado, otras teorías que exhibían las mismas supuestas virtudes han acabado confirmadas empíricamente. Pero, de nuevo, para que esta metainducción funcione, la presencia de tales rasgos debería contribuir a explicar el éxito predictivo de la teoría. Y ello requiere que no existan otras teorías que, sin exhibir dichas propiedades, gocen del mismo éxito predictivo. Así que, rozando lo paradójico, este tercer argumento comparte con los demás el mismo presupuesto: una baja proliferación de alternativas a la teoría que estamos evaluando.

Por tanto, todos los argumentos analizados por Dawid guardan relación con la infradeterminación de la teoría por los datos. En concreto, suponen que dicha infradeterminación no se da o, al menos, que se da en un grado muy bajo. Dawid sostiene que tales argumentos pueden ser entendidos como criterios de confirmación no empírica en la medida en que reflejen una baja indeterminación o que pongan de manifiesto que, en un determinado contexto teórico, la siempre posible existencia de alternativas empíricamente equivalentes no constituye una amenaza real. Para Dawid, esto es precisamente lo que ocurriría en la teoría de cuerdas.

¿Es cierto? ¿Se encuentran legitimados estos argumentos no empíricos en el caso de la teoría de cuerdas? Por supuesto, los críticos sostienen que no, y la conceptualización de Dawid es aún demasiado reciente para calibrar su recepción. Llegados aquí, hemos de subrayar que tanto los detractores como los defensores de la teoría de cuerdas coinciden en que, en último término, la confirmación de una teoría física es siempre empírica. La diferencia entre unos y otros reside en el valor que conceden a los argumentos no empíricos. Para unos constituyen una suerte de confirmación, mientras que para otros no pasan de meras observaciones laterales.

La propuesta de Dawid aporta una forma plausible de entender en qué se basa la fuerza confirmatoria de tales argumentos. Las voces críticas pueden, y deben, poner a prueba dicha propuesta atendiendo a dos aspectos distintos: por un lado, si es cierto que la teoría de cuerdas cumple con las virtudes que se le atribuyen (por ejemplo, algunos no estarán de acuerdo con que carezca de alternativas viables); por otro, si el cumplimiento de dichos criterios puede ser interpretado, y en qué sentido, como indicio de una confirmación no empírica.

Dawid ha hecho un buen trabajo. Ha señalado hacia dónde apuntan los distintos argumentos —la cuestión de la infradeterminación— y ha puesto de manifiesto que la física actual quizás haya entrado en una fase que podría diferir de su historia pasada en, nada más y nada menos, la manera de entender lo que en ocasiones se considera el elemento esencial de la ciencia: el método científico. Pero, aunque así sea, aún queda mucho trabajo por hacer para entender en qué se fundamentará la física que está por llegar.

PARA SABER MÁS

String theory and the scientific method. Richard Dawid. Cambridge University Press, 2013.
Defend the integrity of physics. George Ellis y Joseph Silk en *Nature*, vol. 516, págs. 321-323, diciembre de 2014.
Why trust a theory? Reconsidering scientific methodology in light of modern physics. Página web del congreso celebrado en Múnich en diciembre de 2015: **www.whytrustatheory2015.philosophie.uni-muenchen.de**

EN NUESTRO ARCHIVO

Universos paralelos. Max Tegmark en *IyC*, julio de 2003.
¿Es la teoría de cuerdas una ciencia? Dieter Lüst en *IyC*, septiembre de 2010.
La inflación a debate. Paul Steinhardt en *IyC*, junio de 2011.
¿Existe el multiverso? George Ellis en *IyC*, octubre de 2011.

SALUD

Los centinelas del sabor amargo

Los receptores del amargor no solo están en la lengua, sino en todo el cuerpo. Actúan como vigilantes que nos protegen de las infecciones

Robert J. Lee y Noam A. Cohen



FUNCIÓN DOBLE: Los receptores gustativos, que se hallan en las papilas de la lengua (*naranja*), también intervienen en la lucha contra las enfermedades. Esta imagen muestra una sección de un milímetro de ancho.

Robert J. Lee es profesor de fisiología y cirugía otorrinolaringológica de la Escuela de Medicina Perelman, en la Universidad de Pensilvania. Como biólogo molecular, ha dedicado más de una década al estudio de las células epiteliales de la nariz y el pulmón.

Noam A. Cohen es profesor de otorrinolaringología en la Universidad de Pensilvania. Cirujano con 15 años de experiencia, es el director de investigación en rinología de la escuela.

IMAGÍNESE EL PEOR RESFRIADO DE SU VIDA. Su nariz se halla totalmente congestionada y respira con dificultad. La presión en los senos nasales le causa dolor de cabeza. No percibe ningún olor, así que todo lo que come le sabe a cartón. Y para colmo de males, siente náuseas y un profundo malestar. Ahora, imagínese que todos esos síntomas, por bien que disminuyan al cabo de una semana, regresan una y otra vez y jamás desaparecen.

Por desgracia, esa es la cruda realidad del paciente con sinusitis crónica (técnicamente, rinosinusitis crónica), una enfermedad nasal y de las vías aéreas altas que solo en EE.UU. afecta a cerca de 35 millones de personas. Para muchas, el tratamiento suele consistir en largas tandas de antibióticos y corticoesteroides. Pero si la medicación no funciona, han de pasar por el quirófano para limpiar las cavidades infectadas del cráneo. Esa delicada operación es cada vez más habitual porque el uso excesivo de los antibióticos ha mermado su eficacia. Actualmente, en EE.UU. una de cada cinco prescripciones de tales medicamentos está destinada a tratar la rinosinusitis y la enfermedad ha entrado en un círculo vicioso que contribuye a difundir las bacterias resistentes, como *Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina (SARM).

Nuestro objetivo es terminar con ese círculo vicioso. Junto con muchos otros investigadores, estamos trabajando para desentrañar los mecanismos de defensa que las células epiteliales de las vías aéreas, las que tapizan el interior de los conductos respiratorios, despliegan contra las infecciones. Una persona corriente respira más de 10.000 litros de aire cada día, gran parte por la nariz, un aire cargado de innumerables bacterias, hongos y virus. Nuestra nariz es la primera línea de defensa. Cada vez que inspiramos, las partículas en suspensión, los virus, las bacterias y las esporas quedan atrapados en ella. Asombrosamente, la mayoría respiramos sin problemas y no sufrimos infecciones respiratorias.

Al parecer, una de las razones de esa inmunidad reside en la lengua. Los receptores del sabor amargo parecen desempeñar también una función defensiva contra las bacterias. Ahora sabemos que esas proteínas receptoras, presentes también en la nariz, activan tres respuestas contra los patógenos. Primero, envían señales que estimulan el movimiento de las células ciliadas, que barren a los intrusos (los cilios son filamentos minúsculos). En segundo lugar, las proteínas del receptor incitan a las células a liberar óxido nítrico, un bactericida. Y por último, mandan señales a otras células para que liberen unas proteínas antimicrobianas llamadas defensinas.

Pero la historia no acaba ahí. Varios investigadores han descubierto que estos receptores, lejos de radicar solo en la lengua y la nariz, también están presentes en otros tramos de las vías aéreas, así como en el corazón, los pulmones, el intestino y otros órganos. Ahora, varios grupos de investigación creemos que estos receptores forman parte de un sistema inmunitario innato distinto de lo conocido hasta la fecha. Posiblemente produzca una reacción más rápida que los anticuerpos y los leucocitos que circulan por el organismo. El sistema inmunitario tarda horas o días en producir los anticuerpos específicos contra los virus y las bacterias. En cambio, la respuesta de los receptores gustativos, si bien más genérica y menos específica contra una bacteria concreta, sobreviene en minutos. Es un verdadero sistema de alerta rápida.

EL GUSTO POR EL PELIGRO

Si pensamos en los receptores gustativos como centinelas que reaccionan ante las sustancias que entran en el cuerpo, es lógico que desempeñen una función en el sistema inmunitario. Con su ubicación en las papilas gustativas, activan la cadena de señales que informa al cerebro del valor nutricional o de la posible toxicidad de lo que nos llevamos a la boca. La lengua percibe cinco sabores básicos: amargo, dulce, salado, ácido y sabroso (o umami). El sentido del gusto protege el aparato digestivo, dándonos la información sobre el alimento que estamos masticando para decidir si debemos tragarlo o no. Los receptores del sabor amargo detectan sustancias venenosas de las plantas, entre ellas alcaloides como la estricnina o la nicotina. El sabor que describimos como «amargo» es percibido a menudo por el cerebro como desagradable porque los receptores evolucionaron para advertir de la presencia de sustancias potencialmente nocivas.

Esa facultad es esencial para nuestra supervivencia y explicaría la gran diversidad de receptores del sabor amargo. Los otros cuatro sabores básicos disponen de un solo receptor cada uno, pero existen por lo menos 25 para los compuestos amargos. La familia de los receptores de tipo 2, o T2R, probablemente evolucionó para reconocer multitud de venenos.

EN SÍNTESIS

Las proteínas que detectan el sabor amargo no solo radican en la lengua, sino en otros órganos que nunca entran en contacto con alimentos.

Se ha descubierto que estas proteínas, denominadas receptores gustativos, activan mecanismos de defensa que eliminan casi en el acto a las bacterias.

Estimular tales receptores con compuestos amargos podría reforzar la respuesta inmunitaria natural y reducir nuestra dependencia de los antibióticos.

SCIENCE SOURCE (*páginas anteriores*)

Las primeras pruebas demostrativas de esa función datan de 2009, cuando investigadores de la Universidad de Iowa descubrieron receptores T2R en las células epiteliales que recubren los pulmones. La pegajosa capa de moco segregada por ellas atrapa los microbios y las sustancias irritantes que inhalamos. Después, los minúsculos cilios celulares baten al compás de 8 a 15 veces por segundo y los arrastran hacia la garganta, donde los deglutimos o los escupimos. El equipo de Iowa descubrió que los cilios de las células pulmonares baten más rápido cuando sus T2R son estimulados por compuestos amargos, lo cual indica que los receptores ayudan a expulsar las sustancias inhaladas potencialmente nocivas de sabor amargo.

En ese momento, investigadores del Campus de Medicina Anschutz de la Universidad de Colorado estaban estudiando los receptores del amargor presentes en un tipo especial de células del hocico de la rata que parecen reaccionar a las sustancias irritantes. Descubrieron que esas células quimiosensibles solitarias, como se las conoce, se activan ante la presencia de ciertas moléculas bacterianas, las N-acil-homoserina lactonas (AHL). Las AHL son liberadas por las bacterias gramnegativas nocivas cuando forman biopelículas. Las biopelículas son comunidades de bacterias como *Pseudomonas aeruginosa*, que se unen entre sí formando una matriz. Esto las hace hasta mil veces más resistentes a los antibióticos que las bacterias menos organizadas y, por tanto, mucho más difíciles de erradicar. Los investigadores de Colorado constataron que las moléculas inductoras de la formación de las biopelículas también estimulaban la actividad de las células quimiosensibles. Las AHL eran el primer compuesto bacteriano que demostraba estimular las células con receptores del sabor amargo, lo cual refuerza la idea de que los receptores detectan intrusos.

Intrigados por esos resultados, en 2011 comenzamos a buscar receptores gustativos en las células epiteliales de la nariz humana, en colaboración con el Centro Monell de los Sentidos Químicos, en Filadelfia, la principal institución dedicada al estudio del olfato y del gusto. Justo cuando en Iowa hallaban los receptores del amargor en el pulmón, daba comienzo nuestra investigación como un pequeño proyecto que pretendía descubrir su presencia en las células nasales: pronto se convertiría en uno de los proyectos más importantes de nuestro laboratorio, cuando hallamos indicios de que ciertos receptores gustativos influían en la vulnerabilidad a la rinosinusitis.

SUPERDEGUSTADORES

Nuestra investigación pretendía hallar, en concreto, el receptor del sabor amargo T2R38, el mejor estudiado de la familia. Esta proteína posee variantes debido a pequeños cambios en los genes que la codifican. También denominados polimorfismos, los más habituales se hallan en los cilios de la nariz y los senos nasales.

El descubrimiento de ese conjunto de receptores nos llevó a explorar la influencia de las diversas formas del T2R38 en el comportamiento de las células nasales. Dos tipos en concreto tienen efectos diametralmente opuestos en el gusto cuando coinciden en la lengua. Uno es muy sensible al amargor, en tanto que el otro no los es en absoluto. Cerca del 30 por ciento de las personas de raza blanca hereda dos copias del gen de la variante insensible del T2R38 (una de cada progenitor), por lo que es incapaz de percibir ciertos compuestos amargos. Otro 20 por ciento posee dos copias del gen funcional y percibe esos compuestos como intensamente amargos. A esas personas se las conoce como «superdegustadores». Los portadores de una copia de cada variante se sitúan a medio camino de ambos.

ANATOMÍA

Receptores gustativos por todo el cuerpo

Si bien se los conoce por su función en la lengua, los receptores del sabor amargo y dulce están presentes en otros órganos y tejidos que nunca entran en contacto con los alimentos. En algunas de esas partes del cuerpo, sobre todo en las vías aéreas, estos receptores desempeñan una función importante para la inmunidad.

Receptores del sabor dulce
Receptores del sabor amargo
Ambos tipos de receptores

Cerebro
Nariz y senos nasales
Cavidad bucal
Tráquea
Timo
Pulmones y bronquios
Corazón
Hueso
Tejido mamario
Intestino delgado
Páncreas
Estómago
Tejido adiposo
Colon
Vejiga
Uretra
Testículos

ANATOMY BLUE

Aprovechando el tejido extirpado en una operación quirúrgica, comparamos el comportamiento de las células nasales portadoras de cada variante (antes habíamos secuenciado sus genes para saber qué tipo de receptor tenían). Para provocar la reacción de los receptores, expusimos las células a feniltiocarbamida (PTC), un compuesto habitual en la prueba del gusto de T2R38. Con sorpresa, descubrimos que las células de los superdegustadores producían gran cantidad de óxido nítrico, en contraste con las células de los insensibles.

Ese hallazgo fue un espaldarazo a nuestra hipótesis de la relación entre el gusto y la inmunidad. El óxido nítrico tiene dos efectos importantes en las bacterias en las vías respiratorias: estimula el batido de los cilios y ejerce una acción bactericida. Gracias a su naturaleza gaseosa, el óxido se dispersa con facilidad fuera de las células respiratorias, penetra en la mucosidad y acaba llegando a las bacterias. Una vez dentro, daña las membranas, las enzimas y el ADN microbianos. Ello explica la gran producción de óxido nítrico en los senos nasales, cuya circulación por las vías aéreas ayuda a prevenir las infecciones.

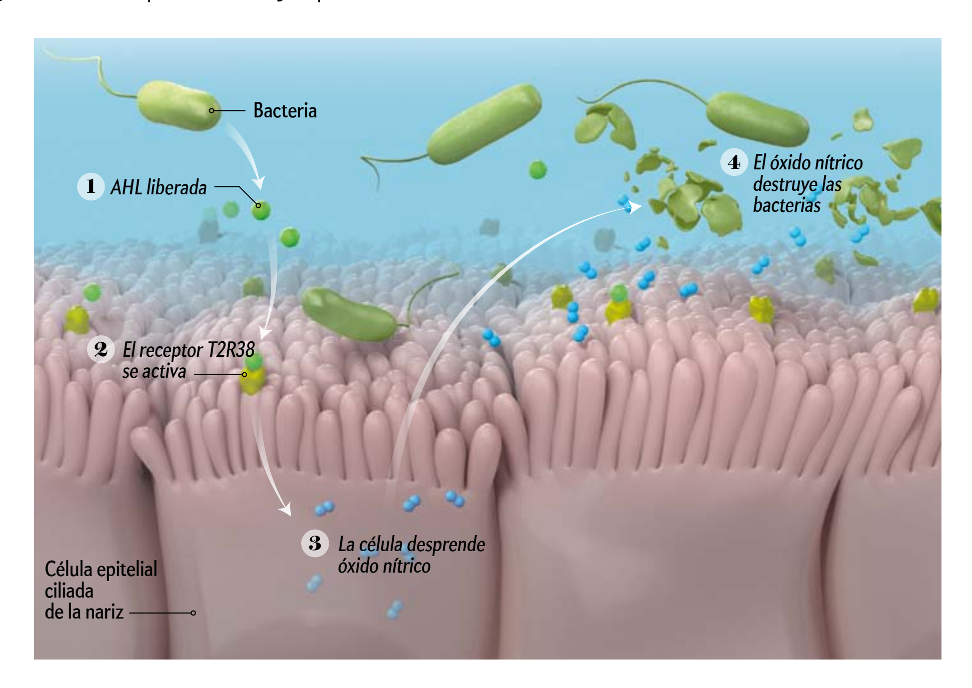
Esas funciones auxiliares antibacterianas nos llevaron a pensar que las versiones del T2R38 podrían alterar la vulnerabilidad

Dos sistemas de defensa basados en receptores del amargor

Las células de las vías aéreas defienden el cuerpo humano contra las bacterias invasoras. Dos de esas células (*diagramas*) emplean los receptores del sabor amargo como medio para detectar y expulsar a los intrusos.

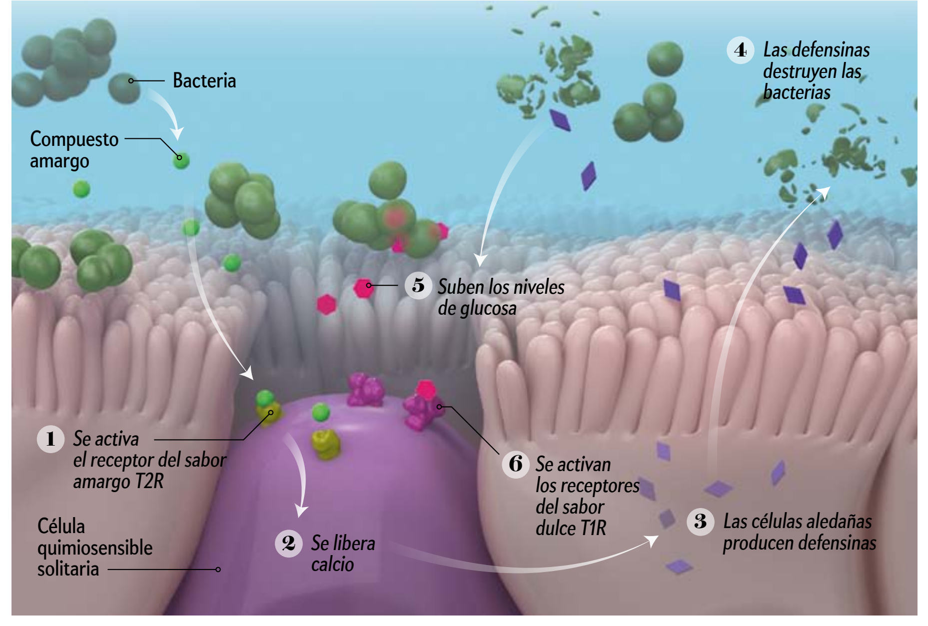
Una reacción sensible

Cuando las bacterias gramnegativas infectan la nariz, liberan unas sustancias llamadas acil-homoserina lactonas (AHL) **1**. Estas son detectadas por los receptores del amargor del grupo de los T2R38, radicados en los filamentos (cilios) de las células de la superficie interna de la nariz **2**. Esas células lanzan óxido nítrico como respuesta a las sustancias de origen bacteriano **3**. El óxido, por ser un gas, se difunde fácilmente, penetra en las bacterias y causa su muerte **4**. Los cilios también se mueven hacia adelante y hacia atrás barriendo las bacterias.



Comienzo y parada

Otras células, llamadas células quimiosensibles solitarias, poseen receptores del sabor amargo (T2R) y del sabor dulce (T1R). Las bacterias infecciosas desprenden un compuesto que entra en contacto con los receptores del amargor **1** y las células responden liberando calcio **2**. Este provoca la secreción de defensinas por parte de las células colindantes **3**. Las defensinas matan a las bacterias y ello hace aumentar las sustancias dulces, como la glucosa **5**, porque dejan de ser ingeridas por las bacterias. La glucosa es detectada por los receptores del sabor dulce **6**, que reducen la actividad de los del sabor amargo, probablemente para evitar una reacción excesiva.



AXS STUDIO

a las infecciones respiratorias superiores. Primero descubrimos en el laboratorio que el óxido nítrico producido por las células nasales de los superdegustadores durante la activación del T2R38 aceleraba el movimiento ciliar y causaba la muerte directa de más bacterias que las células nasales de los individuos insensibles. Seguidamente, vimos que los mismos compuestos bacterianos que habían sido identificados como activadores de las células quimiosensibles nasales del ratón, las AHL, también activaban directamente los receptores T2R38 humanos. Las células nasales de los superdegustadores detectan AHL bacterianas a través de los T2R38 y generan óxido nítrico, mientras que las células de los insensibles no pueden hacerlo. Estos atributos convierten las células de los superdegustadores en más eficientes a la hora de destruir las bacterias productoras de AHL. La conclusión de tales observaciones es que las células epiteliales de las vías aéreas recurren al receptor de sabor amargo T2R38 para detectar la actividad bacteriana y movilizar las defensas.

Desde nuestro descubrimiento del receptor T2R38 en los cilios de las células epiteliales de la nariz humana, el conocimiento acerca de la función de los receptores nasales del gusto ha me-

jorado. Este tipo de receptores también se halla en las células quimiosensibles solitarias de nuestra nariz, análogas a las de los ratones. Llamadas así por estar dispersas y representar únicamente en torno al 1 por ciento de las células de la cavidad nasal, poseen tanto receptores T2R de sabor amargo como T1R de sabor dulce. Hemos observado que cuando sus T2R se activan, envían una señal a las células circundantes para que viertan unas proteínas antimicrobianas llamadas defensinas en las mucosas respiratorias. Las defensinas son capaces de matar multitud de bacterias patógenas, entre ellas *P. aeruginosa* y SARM.

Vimos que la estimulación de los receptores del sabor dulce inhibe la actividad de los receptores amargos, probablemente para evitar que las células liberen demasiadas proteínas antimicrobianas al mismo tiempo. Ya era conocida la existencia de los receptores dulces en otras partes del cuerpo, como el páncreas, donde calibran la glucemia y estimulan la secreción de insulina para regular los niveles de glucosa, pero nuestro trabajo sobre las células nasales demostró que los receptores dulces y amargos desempeñan papeles opuestos en la célula.

Tales experimentos indican que los receptores gustativos constituyen un sistema de alarma precoz propio de las vías aéreas y distinto de las proteínas mejor estudiadas de ese tipo, los receptores TLR [siglas inglesas de receptores de tipo Toll]. A semejanza del T2R, los TLR activan el sistema inmunitario cuando son estimulados por ciertas moléculas bacterianas, pero hay por lo menos una diferencia importante entre ambos. Algunas intervenciones de estos últimos son mucho más lentas y requieren horas o días para entrar en liza. Una es la estimulación de ciertos genes productores de anticuerpos que se unen a los invasores para señalarlos con el fin de que sean destruidos. El T2R38 y sus afines, en cambio, desencadenan respuestas en cuestión de segundos o minutos. De ello se deduce la importancia que pueden tener estos receptores gustativos en la reacción inmediata contra la infección en ciernes. Otros receptores inmunitarios serán más decisivos contra la infección consolidada, cuando la primera respuesta no basta y hay que pedir refuerzos.

PERSONAS VULNERABLES

La gran diversidad genética de los receptores T2R hace que su papel en la inmunidad resulte aún más enigmático. La mayor parte de los 25 receptores de ese tipo tienen variaciones genéticas que aumentan o reducen su capacidad, lo cual se traduce en una población con sensibilidad diversa a las sustancias amargas. Si la reacción al sabor amargo forma parte de veras de la respuesta inmunitaria contra las bacterias invasoras, esas variaciones podrían marcar diferencias en la manera de combatir las infecciones. La sensibilidad exacerbada al amargor conferiría mayor protección, mientras que la más embotada aumentaría la vulnerabilidad.

Hemos comenzado a contrastar esta hipótesis en pacientes y parece ser correcta. Los millones de personas con rinosinusitis crónica constituyen una población natural para la prueba, además de ser un colectivo que necesita ayuda. Está comprobado que obtienen peores resultados en los cuestionarios de calidad de vida que otros enfermos con afecciones cardíacas y pulmonares. Y tienden a contraer peligrosas infecciones pulmonares y a ver agravadas otras enfermedades respiratorias como el asma. El estudio de cultivos microbianos de pacientes con rinosinusitis ha revelado que las infecciones nasales causadas por bacterias gramnegativas son muy inusuales en los superdegustadores (no son inmunes). Parece lógico, pues son productoras de AHL, los compuestos bacterianos que activan los receptores y estimulan con ello la liberación de óxido nítrico. Otras bacterias no producen AHL, con lo que no activarán estas defensas inmunitarias.

Otras investigaciones clínicas sustentan el papel del T2R38 en la sinusitis. Dos estudios de nuestro grupo en Pensilvania demostraron que los portadores de dos copias del gen del T2R38 superdegustador sufren con menos frecuencia la rinosinusitis grave que los pacientes provistos de dos copias del gen insensible o de una copia de ambos. Un estudio del otorrinolaringólogo Martin Desrosiers, del Centro Hospitalario de la Universidad de Montreal, verificó que el gen del T2R38 insensible es más habitual en los afectados que en la gente sana. También comprobó que la gravedad de la rinosinusitis está vinculada asimismo con variantes en otros dos tipos de receptor T2R: T2R14 y T2R49.

Se están descubriendo otros vínculos entre los receptores gustativos y la inmunidad más allá de la nariz. En 2014 se demostró que las células quimiosensibles del aparato excretor estimulan la micción a través de los receptores T2R cuando detectan *Escherichia coli* patógenas. Esta puede ser una reacción para eliminar las bacterias y evitar las infecciones urinarias. Otro estudio reciente ha demostrado que los neutrófilos y los linfocitos, dos tipos de leucocitos esenciales, también detectan las AHL de *Pseudomonas* a través del receptor T2R38.

Ahora queremos saber si las sustancias que activan los receptores T2R pueden servir como tratamiento para los enfermos de rinosinusitis mediante la estimulación de respuestas antibacterianas más intensas. Los alimentos y bebidas que tomamos a diario contienen una amplísima gama de sustancias amargas que podrían servir: las humulonas y lupulonas de las cervezas con lúpulo, los isotiocianatos de las hortalizas verdes como la col de Bruselas o la limonina de los cítricos. La absintina, otro compuesto amargo del ajenjo presente en la absenta, estimula los T2R de las células quimiosensibles solitarias. En nuestro laboratorio estamos investigando varias formulaciones en busca de una aplicación medicinal. Tal vez algún día nuevos fármacos formulados con compuestos amargos sustituyan a los antibióticos ordinarios en la lucha contra las bacterias.

También creemos que las pruebas de gusto y genéticas relacionadas con los T2R permitirán predecir la sensibilidad a las infecciones. Las variantes naturales de estos receptores quizá nos ayudarán a responder a una pregunta histórica: ¿Por qué algunas personas sufren infecciones respiratorias y otras nunca enferman? Sería fascinante que la respuesta radicara en los receptores del sabor amargo. IyC

PARA SABER MÁS

Taste receptors. Edward S. Hodgson en *Scientific American*, mayo de 1961.
Taste receptor signaling - From tongues to lungs. S. C. Kinnamon en *Acta Physiologica*, vol. 204, n.º 2, págs. 158-168, febrero de 2012.
The bitter taste receptor T2R38 is an independent risk factor for chronic rhinosinusitis requiring sinus surgery. Nithin D. Adappa et al. en el *International Forum of Allergy & Rhinology*, vol. 4, n.º 1, págs. 3-7, enero de 2014.
Bitter and sweet taste receptors regulate human upper respiratory innate immunity. Robert J. Lee y otros en *Journal of Clinical Investigation*, vol. 124, n.º 3, págs. 1393-1405, marzo de 2014.
Taste receptors in innate immunity. Robert J. Lee y Noam A. Cohen en *Cellular and Molecular Life Sciences*, vol. 72, n.º 2, págs 217-236, enero de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

El sentido del gusto. David V. Smith, y R. F. Margolskee en *IyC*, mayo de 2001.
Sentido del gusto. Stefanie Reinberger, en *MyC* n.º 23, 2007.


MANIFIE



Nueve expertos alertan de la erosión de la democracia y de las libertades civiles que podría traer consigo la revolución digital

TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN

¿DEMOCRACIA DIGITAL O CONTROL DEL COMPORTAMIENTO?

Una llamada para garantizar el uso democrático de los macrodatos y de la inteligencia artificial

Dirk Helbing, Bruno S. Frey, Gerd Gigerenzer, Ernst Hafen, Michael Hagner, Yvonne Hofstetter, Jeroen van den Hoven, Roberto V. Zicari y Andrej Zwitter

La revolución digital está en marcha ¿Cómo transformará el mundo? La cantidad de información que producimos se duplica cada año. Dicho de otro modo: en 2016 generaremos tanta información como en toda la historia de la humanidad hasta 2015. Cada minuto realizamos cientos de miles de búsquedas en Google y cientos de miles de publicaciones en Facebook que revelan cómo pensamos y sentimos. Pronto, también las cosas que nos rodean estarán conectadas a Internet, quizás incluso la ropa. Se estima que, de aquí a diez años, habrá 150.000 millones de sensores conectados en red, un número veinte veces superior al de habitantes del planeta. Para entonces, la cantidad de información se duplicará cada doce horas. Muchas empresas ya están intentando convertir estos macrodatos en grandes sumas de dinero.

Todo será inteligente. Dentro de poco, no solo tendremos teléfonos inteligentes, sino también casas inteligentes, fábricas inteligentes y ciudades inteligentes. ¿Debemos esperar que tales progresos desemboquen en países inteligentes y en un planeta más inteligente?

Es cierto que el campo de la inteligencia artificial está consiguiendo avances asombrosos. En particular, está contribuyendo a la automatización del análisis de datos. La inteligencia artificial ya no se programa línea por línea, sino que ha llegado a ser capaz de aprender y progresar por sí misma. Hace poco, el algoritmo DeepMind de Google se enseñó a sí mismo a ganar en 49 juegos de Atari. Los algoritmos actuales pueden reconocer la escritura, el habla y los patrones casi tan bien como los seres humanos, e incluso acaban mejor numerosas tareas. Empiezan a describir el contenido de fotos y vídeos. Hoy, el 70 por ciento de todas las transacciones financieras ya las realizan algoritmos, y buena parte de las noticias digitales se generan de forma automática. Todo ello tiene profundas consecuencias económicas: de aquí a diez o veinte años, los algoritmos habrán desplazado a alrededor de la mitad de los empleos actuales. El 40 por ciento de las 500 mayores empresas habrá desaparecido en una década.

Cabe esperar que, entre 2020 y 2060, los grandes ordenadores superen las capacidades humanas en casi todos los ámbitos. Ante esta situación comienzan a oírse voces de alerta. Visionarios tecnológicos como Elon Musk, de Tesla Motors, Bill Gates, de Microsoft, y el cofundador de Apple Steve Wozniak avisan de que la superinteligencia supone un grave peligro para la humanidad, quizás incluso más que las armas nucleares. ¿Es alarmismo?

Lo indiscutible es que el modo de organizar la economía y la sociedad sufrirá un cambio fundamental. Estamos experimentando la mayor transformación histórica desde el final de la

EN SÍNTESIS

La revolución de los macrodatos está ejerciendo un profundo cambio sobre nuestras sociedades. Los Gobiernos y un pequeño número de corporaciones controlan una ingente cantidad de información, pero el uso que hacen de ella no siempre es transparente.

Las búsquedas y las sugerencias personalizadas pueden emplearse para influir de manera inconsciente en el comportamiento del individuo, lo que las convierte en una poderosa herramienta de control social. Las primeras muestras de ello ya pueden observarse en China y en Singapur.

Nos encontramos en un momento histórico: la nueva sociedad de la información puede derivar hacia una «democracia 2.0», pero también hacia un «feudalismo 2.0». Para evitarlo, urge tomar varias medidas destinadas a asegurar las libertades civiles en la era digital.

ISTOCK/GREYFEBRUARY (*páginas anteriores*)



Dirk Helbing es profesor de ciencias sociales computacionales de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich. Es experto en riesgos globales y propagación de enfermedades.



Bruno Frey es economista y profesor de la Universidad de Basilea, donde dirige el Centro de Investigación en Economía y Bienestar. Es también director de investigación en el Centro de Investigación en Economía, Gestión y Artes de Zúrich.

Segunda Guerra Mundial: a la automatización de la producción y a la invención de coches autónomos sigue ahora la automatización de la sociedad. Nos encontramos ante una encrucijada que augura grandes oportunidades, pero también riesgos considerables. Si elegimos el camino equivocado, podríamos poner en peligro nuestros mayores logros históricos.

En los años cuarenta, el matemático estadounidense Norbert Wiener inventó la cibernética: básicamente, la idea de que el comportamiento de un sistema puede controlarse por medio de una retroalimentación adecuada. Poco después, varios investigadores concibieron la posibilidad de controlar la economía y la sociedad siguiendo este principio básico, pero en aquel momento no disponían de la tecnología necesaria.

Hoy Singapur nos brinda un ejemplo de sociedad controlada por los datos. El programa creado para proteger a la ciudadanía del terrorismo ha terminado por influir en las políticas económicas y de inmigración, en el mercado inmobiliario y en los planes de estudio. China está tomando un camino parecido. En fecha reciente, Baidu, el equivalente chino de Google, invitó al Ejército a tomar parte en el Proyecto Cerebro chino, que aplica algoritmos de aprendizaje profundo a la información que el motor de búsqueda obtiene de sus usuarios. Pero, además, se ha concebido lo que parece ser una forma de control social. Según informaciones recientes, cada ciudadano chino recibirá una «puntuación ciudadana», la cual determinará las condiciones en que puede conseguir un crédito, un empleo o un visado para Europa. Esta vigilancia sobre el individuo incluye el uso que hace de Internet y los contactos sociales que mantiene.

La situación no es tan distinta en Occidente, donde los consumidores se someten a verificaciones de crédito y de solvencia, y donde algunas tiendas en línea ya han comenzado a experimentar con precios personalizados. Asimismo, cada vez es más evidente que todos estamos en el punto de mira de la vigilancia institucional. Esta sospecha se vio confirmada en 2015, cuando la filtración de algunos detalles del programa Karma Police, del servicio secreto británico, reveló un seguimiento masivo de la manera en que los usuarios navegan por Internet. ¿Se está haciendo realidad el Gran Hermano?

SOCIEDAD PROGRAMADA, CIUDADANOS PROGRAMADOS

Todo comenzó de un modo inofensivo. Los motores de búsqueda y las plataformas con recomendaciones empezaron a proponernos ofertas personalizadas de productos y servicios. Estos algoritmos utilizan información basada en nuestros datos personales y en metadatos previamente obtenidos a partir de búsquedas, hábitos de compra y movilidad, así como del entorno social. Oficialmente, la identidad del usuario se encuentra protegida, pero en la práctica puede inferirse con facilidad. Hoy los algoritmos saben lo que hacemos, lo que pensamos y lo que sentimos, posiblemente mejor que nuestros amigos y familiares e incluso mejor que nosotros mismos. Con frecuencia, sus recomendaciones encajan tan bien con nuestros gustos e intereses que las decisiones que tomamos a partir de ellas parecen nuestras, aunque en realidad no lo sean. De hecho, este control remoto sobre nuestra persona funciona cada vez mejor: cuanto más se sepa sobre nosotros, menos probable será que tomemos decisiones libres, no determinadas por terceros.

Pero este proceso no se detendrá ahí. Algunas plataformas de *software* están avanzando hacia la «computación persuasiva». En el futuro, gracias a depuradas técnicas de manipulación, estas plataformas podrán guiarnos a través de series completas de acciones, ya sea para ejecutar paso a paso procesos de trabajo complejos, ya sea para generar sin costes contenidos para plataformas de Internet, con las que las grandes empresas ganan miles de millones. La tendencia pasa de programar computadoras a programar personas.

Las mismas técnicas comienzan a observarse también en política. Agrupadas bajo el nombre de *nudging*, que en este contexto puede traducirse como «insinuación», los Gobiernos intentan con ellas persuadir de forma masiva a los ciudadanos para que adopten comportamientos más sanos o más respetuosos con el medio ambiente: una forma moderna de paternalismo. El nuevo y fraternal Gobierno no solo está interesado en lo que hacemos, sino que también quiere asegurarse de que hacemos lo correcto. En la estela de los macrodatos (*Big Data*), la palabra mágica hoy es *macroinsinuación* (*Big Nudging*). Muchos parecen considerarla una suerte de cetro digital que permite gobernar a las masas con eficiencia y sin necesidad de implicar a los ciudadanos en procesos democráticos. ¿Permitirá todo ello superar los intereses particulares y optimizar el funcionamiento del mundo? Si así fuera, los ciudadanos podrían acabar gobernados por un rey sabio fortalecido por los datos, capaz de crear, casi por arte de magia, como con una varita mágica digital, los resultados económicos y sociales deseados.

CATÁSTROFES PREPROGRAMADAS

Basta echar una ojeada a la bibliografía científica pertinente para ver que, debido a la complejidad del problema, los intentos de controlar las opiniones con miras a «optimizarlas» están condenados al fracaso. La dinámica de la formación de opiniones es una caja llena de sorpresas. Nadie sabe cuál es la mejor manera de utilizar la varita mágica digital; es decir, las técnicas de insinuación. Suele ocurrir que solo a posteriori queda claro qué medidas son correctas y cuáles no. Durante la pandemia de gripe porcina de 2009, por ejemplo, se recomendó la vacunación. Sin embargo, poco después se observó que un porcentaje de quienes recibieron la inmunización contrajo narcolepsia, una

ESCUELA POLITÉCNICA DE ZÚRICH (*Dirk Helbing*); UNIVERSIDAD DE ZÚRICH (*Bruno Frey*)



Gerd Gigerenzer es director del Instituto Max Planck de Investigaciones en Educación de Berlín y del Centro Harding de Competencia en Riesgos, en la misma ciudad. Su investigación se centra en la competencia en riesgos, la comunicación de riesgos y la teoría de toma de decisiones.



Ernst Hafen investiga en el Instituto de Biología Molecular de Sistemas de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, de la que fue rector. En 2012 fundó la sociedad Datos y Salud, la cual busca fomentar la autodeterminación digital en la ciudadanía.

enfermedad poco habitual. Por fortuna, la cantidad de personas que optaron por vacunarse no fue mayor.

Otro ejemplo lo hallamos en los recientes intentos de los seguros médicos por fomentar el ejercicio repartiendo pulseras de actividad inteligentes. El objetivo es reducir las enfermedades cardiovasculares, pero la medida podría conducir a un aumento de las operaciones de cadera. En un sistema complejo, como una sociedad, las mejoras en un ámbito provocan casi inevitablemente el deterioro en otro. Así pues, las intervenciones a gran escala pueden convertirse en graves equivocaciones. Por si fuera poco, los delincuentes, terroristas y extremistas intentarán y conseguirán tarde o temprano hacerse con el control de la varita mágica digital, quizás incluso sin que nos demos cuenta. Los piratas informáticos han accedido a los sistemas de casi todas las empresas e instituciones, incluso a los del Pentágono, la Casa Blanca y el Parlamento Federal alemán.

La falta de transparencia y de un control democrático adecuado crea un problema adicional: la erosión del sistema desde dentro. Los algoritmos de búsqueda y los sistemas de recomendaciones pueden manipularse. Las empresas pueden pujar por ciertas combinaciones de palabras para conseguir resultados más favorables. Y es probable que los Gobiernos también tengan la posibilidad de influir en algunos parámetros. Cabe pensar que, en épocas electorales, recurran a técnicas de *nudging* para persuadir a los votantes indecisos de que les den su apoyo; una manipulación que resultaría difícil de detectar. Por tanto, todo aquel que controle estas técnicas podrá ganar elecciones y alcanzar el poder.

VIGILANCIA DIGITAL

El precedente de China

¿Cómo afecta a nuestras vidas el control sobre la sociedad y la conducta? El sistema de «puntuación ciudadana» que se está ensayando en China puede darnos una idea. La clasificación de los ciudadanos chinos en una escala unidimensional no solo busca una vigilancia exhaustiva. Dicha puntuación depende de los clics del sujeto en Internet y de si su conducta es políticamente correcta o no, y determina las condiciones para acceder a un crédito, a ciertos puestos de trabajo y a sus visados de viaje. Ello implica privar a la población de su condición de adulta y controlarla socialmente. También el comportamiento de amigos y conocidos afecta a la puntuación; es decir, se emplea el principio de responsabilidad del clan: todos se convierten en guardianes de la virtud y, al mismo tiempo, en una suerte de delatores políticos. Quienes piensan de un modo heterodoxo son aislados.

En última instancia, si en los países democráticos se extendiesen unos principios similares, sería irrelevante que fuese el Estado o una gran empresa quien marcara las reglas. En ambos casos, los pilares de la democracia se encontrarían en peligro. Algunas consecuencias serían las siguientes:

- La vigilancia y la evaluación de todas las actividades que dejan rastro digital crearía un «ciudadano de cristal», transparente, cuya dignidad y privacidad se degradarían.
- Las decisiones ya no se tomarían con libertad, pues contravenir los criterios del Gobierno o de las empresas acarrearía consecuencias negativas. La autonomía del individuo quedaría, en principio, abolida.
- Se castigaría cada pequeño error y nadie estaría libre de sospecha. La presunción de inocencia quedaría obsoleta. La vigilancia policial predictiva podría incluso llevar a castigar transgresiones que no se hubiesen cometido pero que se esperase que fueran a ocurrir.
- Dado que ningún algoritmo puede operar completamente libre de errores, los principios de equidad y de justicia se verían reemplazado por un nuevo tipo de arbitrariedad contra la que los ciudadanos apenas podrían defenderse.
- Condicionar desde el exterior los objetivos de los individuos limitaría las posibilidades de desarrollo personal y, por tanto, también el pluralismo democrático.
- La cultura local y las normas sociales dejarían de ser la base que determina el comportamiento adecuado en cada situación.
- El control de la sociedad con una función-objetivo unidimensional aumentaría los conflictos y, por tanto, la inseguridad. Cabría esperar grandes inestabilidades, como las que se han producido en el sistema financiero.

Este tipo de control social nos alejaría del ideal del ciudadano responsable y nos conduciría hacia una sumisión propia de un «feudalismo 2.0», una situación diametralmente opuesta a los valores democráticos. En su lugar, deberíamos encaminarnos a una «democracia 2.0», basada en la autodeterminación digital. Para ello son necesarias tecnologías democráticas; es decir, sistemas de información compatibles con los principios democráticos.





Michael Hagner es profesor de estudios sociales sobre ciencia en la Escuela Politécnica Federal de Zúrich. Investiga la relación entre ciencia y democracia, la historia de la cibernética y el impacto de la digitalización en las publicaciones académicas.



Yvonne Hofstetter es abogada y especialista en inteligencia artificial. Es directora ejecutiva de Teramark Technologies, una compañía que desarrolla sistemas de control para optimizar los servicios de mensajería urbanos y las técnicas algorítmicas de gestión de riesgos, entre otros fines.

Este problema se ve agravado por el hecho de que, en Europa, un solo motor de búsqueda copa cerca del 90 por ciento del mercado, con lo que podría ejercer una influencia decisiva en la ciudadanía y la política europeas desde Silicon Valley. Aunque, en su sentencia del 6 de octubre de 2015, el Tribunal de Justicia de la Unión Europea puso límites a la transferencia indiscriminada de datos europeos, el problema de fondo continúa sin resolverse, tan solo se ha trasladado geográficamente.

¿Qué efectos colaterales no deseados podemos esperar? Para que la manipulación pase inadvertida, es necesario que exista un «efecto de resonancia»: las propuestas que se ofrecen a cada individuo deben estar lo suficientemente personalizadas, lo que implica que las tendencias de cada persona se ven reforzadas por la repetición. La situación es similar a la que se da en una cámara de eco: al final, todo lo que nos llega son nuestras propias opiniones reflejadas. Eso conduce a una polarización de la sociedad, con la formación de grupos disconexos que ya no se entienden y cada vez más enfrentados. Por tanto, la información personalizada puede romper involuntariamente la cohesión social. Este fenómeno se observa hoy en la política estadounidense, donde demócratas y republicanos se han ido distanciando de tal manera que los compromisos políticos se tornan casi imposibles. Como resultado, se produce una fragmentación, quizás incluso una desintegración, de la sociedad.

Debido a ese efecto de resonancia, los cambios de opinión a gran escala solo pueden producirse de manera lenta y gradual. Las consecuencias se observarán a largo plazo, pero, de igual modo, no se podrán revertir fácilmente. Es posible, por ejemplo, que el resentimiento contra las minorías o los inmigrantes acabe fuera de control; un sentimiento nacional exacerbado puede provocar discriminación, extremismo y conflictos.

Quizá más significativo aún sea el hecho de que los métodos de manipulación cambian el modo en que tomamos decisiones. Nos llevan a ignorar, al menos temporalmente, factores sociales y culturales que de otro modo consideraríamos relevantes. En resumen, el uso de métodos de manipulación a gran escala podría causar un grave perjuicio social, incluido el embrutecimiento, en cualquier caso ya muy extendido, del comportamiento en el mundo digital. ¿A quién se debe considerar responsable?

CUESTIONES LEGALES

Todo lo mencionado hasta ahora suscita cuestiones legales que no deberían ignorarse. Tengamos en cuenta las demandas milmillonarias interpuestas en los últimos años contra tabacaleras, bancos, empresas de tecnología de la información y fabricantes de automóviles. Pero ¿qué leyes podrían estar infringiéndose?

En primer lugar, es evidente que las técnicas de manipulación limitan la libertad de elección. Si el control remoto de nuestro comportamiento funcionase a la perfección, seríamos en esencia esclavos digitales, ya que solo podríamos ejecutar decisiones que en realidad otros ya han tomado con anterioridad. Por supuesto, tales técnicas solo son efectivas hasta cierto punto. Con todo, nuestra libertad tiende a desaparecer de forma lenta pero segura; tan lenta, de hecho, que hasta ahora ha provocado poca resistencia por parte de la población.

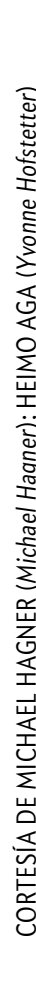
En este contexto, las ideas de Immanuel Kant cobran una gran relevancia. Entre otras cosas, el filósofo aseveró que un Estado que intenta determinar la felicidad de sus ciudadanos es una tiranía. El derecho al desarrollo personal solo puede ser ejercido por aquellos que controlan sus propias vidas, lo que presupone la autodeterminación informativa. Hablamos nada menos que de algunos de nuestros derechos más importantes. Una democracia no podrá funcionar bien a menos que se respeten. Si se limitan, socavaremos nuestras constituciones, nuestras sociedades y nuestros Estados.

Habida cuenta de que las técnicas de manipulación funcionan de un modo similar a la publicidad personalizada, también otras leyes se ven afectadas. La publicidad ha de ser etiquetada como tal y no debe ser engañosa. Tampoco está permitido utilizar algunos trucos psicológicos, como los estímulos subliminales. Por ejemplo, está prohibido mostrar la imagen de un refresco en una película durante una fracción de segundo, ya que en tal caso la publicidad no se percibe de modo consciente, pero sí puede ejercer un efecto en el subconsciente. Por otro lado, la recopilación y el procesamiento generalizado de datos personales que se hace hoy en día no es, desde luego, compatible con las leyes de protección de datos vigentes en Europa.

Por último, la legalidad de los precios personalizados resulta cuestionable, ya que esta práctica podría entrañar un mal uso de la información privilegiada. Otros aspectos relevantes son las posibles violaciones de los principios de igualdad y de no discriminación, así como de las leyes de libre competencia, ya que no se garantiza el acceso al mercado libre ni a la transparencia de precios. La situación es similar a la de las empresas que venden sus productos más baratos en otros países, pero que intentan evitar que se compre vía esos mismos países. En el pasado, tales conductas han sido sancionadas con grandes multas.

La publicidad y los precios personalizados no pueden compararse con la publicidad clásica ni con los cupones de descuento; estos últimos no son específicos y, además, no invaden la privacidad con el objetivo de aprovecharse de nuestra debilidad psicológica y bloquear nuestro pensamiento crítico.

Asimismo, no podemos obviar el hecho de que, en el mundo académico, incluso experimentos inofensivos de toma de decisiones son considerados ensayos con sujetos humanos y deben ser aprobados por un comité ético que ha de rendir cuentas ante la esfera pública. En todos estos casos, se requiere que los



CORTESÍA DE MICHAEL HAGNER (*Michael Hagner*); HEIMO AGA (*Yvonne Hofstetter*)



Jeroen van den Hoven es profesor de ética y tecnología en la Universidad Técnica de Delft y redactor jefe de la revista *Ethics and Information Technology*. Es presidente de los Programas de Innovación Responsable del Consejo Holandés de Investigaciones.



Roberto V. Zicari es profesor de bases de datos y sistemas de la información en la Universidad Goethe de Fráncfort, donde ha fundado el Laboratorio de Macrodatos. Es experto en macrodatos, emprendimiento e innovación.

participantes den su consentimiento informado. En contraposición, resulta del todo inadecuado que un simple clic sirva para confirmar que se está de acuerdo de arriba abajo con el contenido de un contrato de cien páginas de «condiciones de uso». Y ese es el procedimiento empleado actualmente por muchas plataformas de información.

A pesar de ello, las técnicas de manipulación han llevado a experimentar con millones de personas sin que estas hayan sido informadas, sin transparencia y sin limitaciones éticas. Incluso grandes redes sociales como Facebook o servicios de citas en línea como OK Cupid ya han admitido públicamente que llevan a cabo este tipo de experimentos sociales. Si queremos evitar las investigaciones irresponsables en humanos y en la sociedad (pensemos en los casos del pasado reciente de psicólogos implicados en escándalos relacionados con torturas), necesitamos con urgencia establecer normas exigentes; en particular, criterios de calidad científica y un código de conducta similar al juramento hipocrático.

¿HAN SIDO PIRATEADOS NUESTRO PENSAMIENTO, NUESTRA LIBERTAD Y NUESTRA DEMOCRACIA?

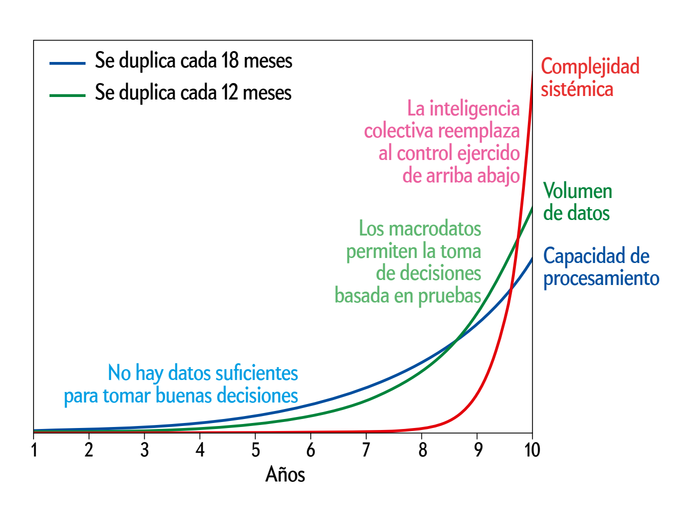
Supongamos que hubiera una máquina superinteligente dotada de un conocimiento divino y de capacidades sobrehumanas. ¿Seguiríamos reverentemente sus instrucciones? Es más que posible. Pero, si lo hiciéramos, las advertencias de Elon Musk, Bill Gates, Steve Wozniak, Stephen Hawking y otros se habrían hecho realidad: los ordenadores controlarían el mundo. Es necesario dejar claro que una superinteligencia también puede cometer errores, mentir, perseguir intereses egoístas o ser manipulada. Y sobre todo, que no puede compararse con la inteligencia colectiva, distribuida, de toda una población.

La idea de reemplazar el pensamiento de todos los ciudadanos por un grupo de computadoras coordinadas sería absurda, pues reduciría de manera drástica la calidad de las soluciones que cabría encontrar a un problema. Es evidente que, a pesar del flujo de datos y del uso de información personalizada, los problemas del mundo no han disminuido. Al contrario. La paz mundial es frágil. El cambio climático podría causar a largo plazo la mayor pérdida de especies desde la extinción de los dinosaurios. También estamos muy lejos de superar la crisis financiera, así como su impacto en la economía y la sociedad. Se estima que la ciberdelincuencia causa una pérdida anual de tres billones de dólares. Los Estados y los terroristas se están preparando para una ciberguerra.

En un mundo rápidamente cambiante, una superinteligencia no será capaz de tomar decisiones perfectas. El volumen de información aumenta más deprisa que la capacidad para procesarla, y las tasas de transferencia de datos son limitadas. Esto provoca que, a la hora de buscar soluciones, se prescinda de conocimientos y hechos locales que, sin embargo, son importantes. Los métodos de control locales y distribuidos suelen funcionar mejor que los centralizados, especialmente en sistemas complejos con un comportamiento altamente variable, poco predecible e imposible de optimizar en tiempo real. Esto se observa ya en el control del tráfico en las ciudades y, más aún, en los sistemas sociales y económicos de un mundo cada vez más interconectado y globalizado.

Asimismo, existe el peligro de que el empleo de poderosos algoritmos para manipular nuestras decisiones socave las bases de la inteligencia colectiva, la cual es capaz de adaptarse con flexibilidad a los cambios de nuestro complejo mundo. Para que la inteligencia colectiva funcione, los individuos deben gozar de independencia a la hora de buscar información y tomar decisiones. Si, por el contrario, los algoritmos determinan nuestros juicios y decisiones, seremos víctimas de un lavado de cerebro. Nos convertiríamos en seres dotados de razón degradados a meros receptores de órdenes que responderían a los estímulos de forma automática. En otras palabras: la información personalizada levanta una especie de «burbuja-filtro» a nuestro alrededor, una suerte de cárcel digital para nuestro pensamiento. En tales condiciones, ¿cómo florecerían la creatividad y el pensamiento original?

Por último, un control centralizado y tecnocrático de la sociedad y del comportamiento que se valiese de un sistema de



CRECIMIENTO DIGITAL: En pocos años, la rápida interconexión mundial ha aumentado de forma explosiva la complejidad de nuestra sociedad (*rojo*). Hoy los macrodatos nos permiten tomar mejores decisiones (*verde claro*), pero los sistemas de control centralizados se tornarán cada vez menos eficaces. En su lugar, crecerá la importancia del control distribuido (*rosa*), por lo que solo a través de la inteligencia colectiva podrán encontrarse soluciones adecuadas.

DIRK HELBING (*gráfico*); YVONNE COMPIER (*Jeroen van den Hoven*); C. SATTLER (*Roberto V. Zicari*)



Andrej Zwitter es profesor de relaciones internacionales y ética en la Universidad de Groninga. Ha investigado sobre las leyes del estado de emergencia, la política de la ayuda humanitaria y el impacto de los macrodatos en la ética y la política internacional.

información superinteligente resultaría en una nueva forma de dictadura. Una sociedad controlada desde arriba con el estandarte de un «paternalismo blando» no sería, en última instancia, más que un régimen totalitario pintado de color de rosa. De hecho, el objetivo de la macroinsinuación es uniformizar las acciones de un gran número de personas y manipular sus perspectivas y decisiones, lo que la acerca a la propaganda y a la incapacitación selectiva de los ciudadanos mediante un control estatal del comportamiento. Tememos que las consecuencias a largo plazo sean fatales, especialmente si tenemos en cuenta el deterioro parcial de la cultura antes mencionado.

POR UNA SOCIEDAD DIGITAL MEJOR

A pesar de la feroz competitividad global, sería bueno que las democracias no tiraran por la borda los logros de siglos. A diferencia de otros regímenes políticos, las democracias occidentales cuentan con la ventaja de haber aprendido a manejar el pluralismo y la diversidad. Ahora solo les queda aprender a sacarles mayor provecho.

En el futuro, los países que logren un buen equilibrio entre empresas, Gobierno y ciudadanos serán los más exitosos. Para ello es necesario un pensamiento en red y la creación de un ecosistema de información, innovación, productos y servicios. Para que dicho ecosistema funcione bien, no solo es importante crear oportunidades para la participación, sino también apoyar la diversidad. En general, no existe ningún método para determinar la mejor función-objetivo; es decir, aquello que debe optimizarse. ¿Qué deberíamos optimizar: el producto nacional bruto per cápita o la sostenibilidad? ¿El poder o la paz? ¿La esperanza de vida o la satisfacción personal? Con frecuencia, aprendemos demasiado tarde cuál habría sido la mejor elección. Una sociedad plural que permite la búsqueda de varios objetivos a la vez se encuentra más capacitada para vérselas con problemas diversos.

El control centralizado, de arriba abajo, es una solución del pasado, tan solo adecuada para sistemas de baja complejidad. Las soluciones del presente son los sistemas federales y las decisiones mayoritarias. Con el desarrollo cultural y económico, la complejidad social continuará aumentando. Por tanto, la solución para el futuro es la inteligencia colectiva. Ello significa que la llamada «ciencia ciudadana», las plataformas de colaboración (*crowdsourcing*) y las iniciativas de debate en línea constituyen las nuevas herramientas para generar conocimientos, ideas y recursos. La inteligencia colectiva requiere un alto grado de diversidad. Sin embargo, esta se está reduciendo debido a los actuales sistemas de información personalizada, que solo refuerzan las tendencias existentes.

La diversidad social es tan importante como la biodiversidad. No solo alimenta la inteligencia colectiva y la innovación, sino que mejora la resiliencia social, es decir, la capacidad de nuestra sociedad de lidiar con conmociones inesperadas. A menudo, reducir la sociodiversidad también merma la funcionalidad y el rendimiento de la economía y la sociedad. Por esta razón, los regímenes totalitarios suelen acabar enfrentándose con sus vecinos. Las típicas consecuencias a largo plazo son la inestabilidad política y la guerra, como ha sucedido una y otra vez a lo largo de la historia. De ahí que el pluralismo y la participación no deban verse únicamente como concesiones a los ciudadanos, sino como prerrequisitos funcionales de las sociedades prósperas, complejas y modernas.

En resumen, podemos afirmar que nos encontramos ante una encrucijada. Para bien o para mal, los macrodatos, la inteligencia artificial, la cibernética y la economía conductual determinan nuestra sociedad. Si estas tecnologías de uso generalizado no son compatibles con los valores fundamentales de nuestra sociedad, antes o después causarán un gran perjuicio. Podrían conducirnos hacia una sociedad automatizada y con características totalitarias. En el peor de los casos, una inteligencia artificial centralizada controlaría lo que sabemos, lo que pensamos y cómo actuamos. Estamos en un momento histórico en el que tenemos que decidir el camino adecuado; un camino que permita a todos beneficiarse de la revolución digital.

Por tanto, los firmantes de este artículo instamos a adoptar los siguientes principios fundamentales:

1. Descentralizar paulatinamente el funcionamiento de los sistemas de información.
2. Apoyar la autodeterminación y la participación informativas.
3. Mejorar la transparencia para lograr una mayor confianza.
4. Reducir la distorsión y la contaminación de la información.
5. Permitir al usuario el control de los filtros de información.
6. Promover la diversidad social y económica.
7. Mejorar la capacidad de cooperación mutua de los sistemas técnicos.
8. Crear asistentes digitales y herramientas de coordinación.
9. Apoyar la inteligencia colectiva.
10. Promover la madurez de los ciudadanos en el mundo digital, una «Ilustración digital».

Siguiendo esta hoja de ruta, todos nos beneficiaríamos de los frutos de la revolución digital: la economía, el Gobierno y los ciudadanos. ¿A qué estamos esperando? IyC

PARA SABER MÁS

Risiko: Wie man die richtigen Entscheidungen trifft. G. Gigerenzer. Bertelsmann, Múnich, 2013.
Sie wissen alles: Wie intelligente Maschinen in unser Leben eindringen und warum wir für unsere Freiheit kämpfen müssen. Y. Hofstetter. Bertelsmann, Múnich, 2014.
Big data ethics. A. Zwitter en *Big Data & Society*, vol. 1, n.º 2, noviembre de 2014.
Beneficial and exploitative nudges. B. S. Frey y J. Gallus en *Economic Analysis of Law in European Legal Scholarship*. Springer, Heidelberg, 2015.
The automation of society is next: How to survive the digital revolution. D. Helbing. CreateSpace, 2015.
Handbook of ethics, values, and technological design. Dirigido por J. van den Hoven et al. Springer, Heidelberg, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Nuevas concepciones de la privacidad. Jaron Lanier en *IyC*, enero de 2014.
El buen uso de los macrodatos. Alex P. Pentland en *IyC*, octubre de 2014.
Complejidad, tecnología y sociedad. Carlos Gershenson en *IyC*, enero de 2015.

TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN

UNA ESTRATEGIA PARA LA ERA DIGITAL

Una hoja de ruta para evitar el retroceso de la democracia en la sociedad de la información

Dirk Helbing, Bruno S. Frey, Gerd Gigerenzer, Ernst Hafen, Michael Hagner, Yvonne Hofstetter, Jeroen van den Hoven, Roberto V. Zicari y Andrej Zwitter

Los macrodatos y la inteligencia artificial suponen, sin duda, innovaciones importantes. Cuentan con un enorme potencial como catalizadores de la creación de valor económico y progreso social, y actúan en ámbitos tan variados como la atención sanitaria o las ciudades sostenibles. Sin embargo, resulta inaceptable usar estas tecnologías para incapacitar a los ciudadanos. Las técnicas de manipulación digital y las «puntuaciones ciudadanas» hacen un uso abusivo de los datos personales, los cuales emplean para ejercer un control del comportamiento que presenta tintes totalitarios. Este proceder no solo es incompatible con los derechos humanos y los principios democráticos, sino inadecuado para gestionar sociedades modernas e innovadoras. Para resolver los verdaderos problemas a los que se enfrenta el mundo, necesitamos mejoras en los campos de la información y de la gestión del riesgo. Ya existen áreas de investigación e iniciativas innovadoras que ejemplifican cómo los macrodatos y la inteligencia artificial pueden usarse en beneficio de la sociedad.

¿Qué hacer, pues? En primer lugar, incluso en estos momentos de revolución digital, deberían protegerse los derechos fundamentales de los ciudadanos, ya que estos constituyen un prerrequisito funcional básico de una sociedad moderna y democrática. Para ello es necesario elaborar un nuevo contrato social basado en la confianza y en la cooperación, que no considere a los ciudadanos y a los clientes como obstáculos o como recursos que pueden explotarse, sino como compañeros de viaje. El Estado debería proporcionar un marco regulador adecuado que permitiese la compatibilidad de la tecnología con la democracia. Esas reglas deberían garantizar la autodeterminación informativa no solo en teoría, sino también en la práctica, ya que constituyen una condición previa para conducir nuestras vidas de manera responsable.

Asimismo, deberíamos tener derecho a una copia de la información personal que se ha recopilado sobre nosotros. Habría que regular por ley la obligación de que esta información se enviara automáticamente, en un formato estandarizado, a un buzón personal de datos mediante el cual los individuos pudiesen supervisar el uso que se hace de ellos. Para asegurar una mayor privacidad y evitar la discriminación, el uso no autorizado de datos tendría que estar castigado por ley. De este modo, cada individuo podría decidir quién puede usar su información,

EN SÍNTESIS

El mal uso de los macrodatos y de la inteligencia artificial puede derivar en una merma efectiva de los derechos civiles. Para evitarlo, la sociedad, los Gobiernos, las empresas y el mundo académico deben tomar conciencia del problema y actuar en consecuencia.

Los Estados deberían comenzar a trabajar en un marco regulador que garantice a los individuos el acceso a la información que se recopila sobre ellos. La gestión de esa información debe ser transparente y su uso no autorizado debería estar castigado por ley.

Los sistemas educativos deberían fomentar un uso crítico y responsable de la tecnología digital. La sociedad civil debería contribuir a la innovación y a la solución de problemas globales mediante plataformas participativas que fomenten la colaboración y el debate.

con qué propósito y durante cuánto tiempo. Además, deberían tomarse medidas adecuadas para garantizar que los datos se almacenan y se intercambian de forma segura.

Con sistemas de reputación avanzados, que tengan en cuenta múltiples criterios, podría mejorarse la calidad de la información en que se basan nuestras decisiones. Si el usuario pudiera seleccionar y configurar los algoritmos de filtrado, recomendación y búsqueda de datos, en vez de que lo haga el proveedor, estaríamos menos expuestos a la manipulación que se ejerce mediante una información distorsionada. Además, necesitamos un procedimiento eficaz para que los ciudadanos puedan presentar reclamaciones, así como sanciones efectivas ante el incumplimiento de las normas. Por último, para crear la transparencia y confianza suficientes, las principales instituciones científicas deberían actuar como depositarias de la información y de los algoritmos, que actualmente escapan al control democrático. Ello también requeriría un código de conducta adecuado que, como mínimo, deberían cumplir todos los que tuviesen acceso a información y algoritmos delicados: una suerte de «juramento hipocrático» para los profesionales de la tecnología de la información.

Es necesario diseñar una hoja de ruta digital para establecer las bases de nuevos perfiles profesionales y del futuro de la sociedad digital. Cada año invertimos miles de millones en el sector agrícola y en infraestructuras públicas, escuelas y universidades para beneficio de la industria y del sector servicios. ¿Qué sistemas públicos necesitaríamos para garantizar el éxito de la sociedad digital?

UNA NUEVA SOCIEDAD DIGITAL

En primer lugar, hacen falta nuevos modelos educativos, más centrados en el pensamiento crítico, la creatividad, la inventiva y el espíritu emprendedor que en crear trabajadores estandarizados, cuyas tareas las realizarán en el futuro robots y algoritmos informáticos. La educación también debería enseñar a utilizar la tecnología digital de un modo responsable y crítico. Los ciudadanos han de ser conscientes de que el mundo digital y el físico están entrelazados. Para poder ejercer sus derechos con eficacia y responsabilidad, la ciudadanía no solo debe conocer el funcionamiento de estas tecnologías, sino también sus usos ilegítimos. Por eso es tan necesario que la ciencia, la industria, la política y las instituciones educativas pongan este conocimiento al alcance de todos.

En segundo lugar, necesitamos una plataforma participativa que facilite trabajar por cuenta propia, emprender proyectos ideados por uno mismo, buscar socios, comercializar productos y servicios en todo el mundo, gestionar recursos y pagar impuestos y cotizaciones a la seguridad social. Como complemento, las ciudades y los pueblos podrían crear centros para las comunidades digitales nacientes (por ejemplo, los conocidos como FabLabs), donde las ideas puedan desarrollarse en común y ensayarse gratuitamente. Gracias al enfoque abierto e innovador propio de estos centros se promovería la innovación colaborativa a gran escala.

Los concursos podrían proporcionar incentivos adicionales para la innovación, ayudarían a incrementar la visibilidad pública e impulsarían la creación de una sociedad digital participativa. Podrían ser especialmente útiles en la movilización de la sociedad civil para promover propuestas locales que contribuyesen a la solución de problemas globales (por ejemplo, mediante «Olimpiadas Climáticas»). Así, las plataformas dedicadas a coordinar recursos limitados ayudarían a liberar el inmenso potencial de la economía colaborativa, en gran medida todavía sin explotar.

Con una estrategia de datos abiertos, el Estado y la industria aumentarían la cantidad de datos a disposición de la ciencia y el uso público. De esa forma se crearían las condiciones adecuadas para desarrollar un ecosistema de información e innovación eficiente que avance al ritmo de los desafíos de nuestro mundo. Todo ello podría fomentarse rebajando impuestos, al igual que se recortaron para favorecer el uso de tecnologías respetuosas con el medio ambiente.

En tercer lugar, la creación de un «sistema nervioso digital» gestionado por los ciudadanos daría acceso generalizado a las nuevas oportunidades que ofrece la Internet de las Cosas y pondría a disposición de todo el mundo los datos de las mediciones en tiempo real. Si queremos usar los recursos de una manera más sostenible y frenar el cambio climático, debemos sopesar los efectos colaterales positivos y negativos de nuestras interacciones con otros y con el medio. Con circuitos de retroalimentación adecuados, sería posible influir en la dinámica de los sistemas complejos para que adopten, de forma autoorganizada, el comportamiento deseado.

APROVECHAR LA COMPLEJIDAD

Sin embargo, para que todo ello llegue a buen puerto, será necesario que los innovadores económicos, políticos y sociales dispongan de sistemas de incentivos y de intercambio. De esta manera, se podrían crear mercados completamente novedosos y sentar las bases de una nueva prosperidad. La liberación del casi ilimitado potencial de la economía digital se vería muy favorecida por un sistema financiero pluralista (por ejemplo, con monedas individuales) y nuevas normas que recompensen la innovación.

Para gestionar mejor la complejidad y la diversidad del mundo del futuro y convertirlas en aliadas, serán necesarios asistentes digitales personales. Estos también se beneficiarán del desarrollo en el campo de la inteligencia artificial. Cabe esperar que, en el futuro, las redes que combinen la inteligencia artificial y la humana se creen y reconfiguren con flexibilidad. Para seguir controlando nuestras vidas, estas redes deberán estar administradas de forma no centralizada. Además, tendríamos que poder conectarnos y desconectarnos cuando lo deseemos.

Por último, una «Wikipedia de las Culturas» ayudaría a coordinar y compatibilizar las distintas actividades de un mundo altamente diverso. Esta Wikipedia explicitaría los principios de éxito de las diferentes culturas del mundo, hoy en su mayor parte implícitos, lo que permitiría combinarlos de nuevas maneras. Este «Proyecto Genoma Cultural» sería también una suerte de proyecto de paz, porque sensibilizaría a la ciudadanía sobre el valor de la diversidad sociocultural. Hace tiempo que las multinacionales saben que los equipos diversos y multidisciplinares son más efectivos que los homogéneos. Sin embargo, en muchos lugares todavía no existe el marco necesario para recopilar de manera eficiente el conocimiento y las ideas de muchas personas con el fin de crear inteligencia colectiva. Para cambiar esta situación, sería de gran utilidad disponer de plataformas de deliberación en Internet. Estas también podrían crear las condiciones necesarias para hacer realidad una democracia 2.0, con mayores oportunidades de participación para los ciudadanos. Todo ello supondría un logro importante, ya que muchos de los problemas que hoy afronta el mundo solo podrán abordarse con la colaboración de la sociedad civil. IyC



TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN

¿PROFETAS DE UN APOCALIPSIS DIGITAL?

La digitalización guarda semejanzas con otras revoluciones tecnológicas del pasado, como la que trajo consigo la invención del automóvil. El alarmismo está fuera de lugar

Manfred Broy

Vaya por delante que la importancia y vigencia de los valores que defiende el Manifiesto Digital, como la madurez de la ciudadanía, los derechos fundamentales y la autodeterminación informativa, se encuentran fuera de toda duda. Lo mismo ocurre con el derecho a la privacidad. También está claro que es lícito preguntarse hasta qué punto la digitalización podría poner en peligro estos derechos civiles inalienables. Sin embargo, el alarmismo de los luditas digitales no ayuda en absoluto a este debate, como tampoco lo hacen las especulaciones disparatadas acerca de que con la digitalización todo será posible, incluidas las máquinas superinteligentes.

¿Qué es, en realidad, la digitalización? En el fondo, la tecnología digital existe desde hace ya más de sesenta años. Pero, de un uso inicial en áreas muy especializadas, con el tiempo ha ido ganando terreno en todos los ámbitos imaginables. De ser una disciplina de laboratorio, la tecnología digital ha pasado a convertirse en una de gran utilidad —y hoy indispensable— en todo tipo de aplicaciones técnicas y empresariales, al tiempo que se ha acercado de manera considerable a la vida cotidiana de las personas. Hoy utilizamos con toda naturalidad teléfonos inteligentes, Internet y otros dispositivos, equipos y sistemas llenos de *software*. La causa última de este uso intensivo es lo atractivo que nos resulta y las muchas posibilidades que nos ofrece. A pesar de ello, el Manifiesto ignora casi por completo los innegables beneficios de la tecnología digital.

Por nombrar solo algunos ejemplos, la seguridad del tráfico aéreo y toda una serie de avances en medicina son consecuencia directa de la digitalización. De igual modo, la eficiencia energética solo podrá alcanzarse gracias a ella. Y las comunicaciones móviles a escala mundial, impensables sin la tecnología digital, han hecho posible que las personas se relacionen con independencia de su realidad geográfica. ¿Por qué ponemos de relieve los peligros de la tecnología digital sin mostrar sus aspectos positivos?

ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Pero centrémonos ahora en el Manifiesto. Por supuesto, sería totalmente inaceptable que la digitalización se utilizara para incapacitar a la ciudadanía, por lo que sin duda necesitamos nuevas leyes específicas que protejan los derechos fundamentales de las personas. Sin embargo, no es la primera vez que una tecnología cambia drásticamente nuestro entorno vital. Así ha ocurrido, por ejemplo, con el automóvil en los últimos cien años. También en ese caso se adaptaron las infraestructuras a la nueva tecnología. Y también se produjeron —y siguen produciéndose— multitud de daños colaterales: desde el impacto ambiental al todavía elevado número de accidentes con daños personales. La introducción del automóvil obligó a redactar nuevas leyes. Con la digitalización ocurre algo muy similar, si bien es cierto que esta última afecta más a las personas como tales y a su naturaleza interior.

Hay un aspecto del Manifiesto Digital que llama la atención. Contiene una serie de afirmaciones que, como mínimo, no están demostradas y son difícilmente demostrables, o que incluso constituyen especulaciones desenfrenadas. Una aseveración como «la inteligencia artificial ya no se programa línea por línea, sino que ha llegado a ser capaz de aprender y progresar por sí misma» resulta, cuando menos, engañosa (especialmente para el profano) y en sentido estricto es sencillamente falsa. Los programas de inteligencia artificial también se programan

EN SÍNTESIS

Es lícito preguntarse hasta qué punto la revolución digital puede poner en peligro los derechos civiles. Sin embargo, dicho análisis no debería ignorar los beneficios potenciales de la digitalización ni exagerar sus capacidades actuales.

En el pasado, también otras revoluciones tecnológicas causaron profundos cambios sociales y provocaron efectos colaterales no deseados. Al igual que entonces se redactaron nuevas leyes, lo mismo ocurrirá en la era digital.

La tecnología digital continuará progresando durante las próximas décadas. Los problemas que puedan surgir de su uso no se solucionarán condenándola de manera irreflexiva, sino juzgándola de la manera correcta y aprovechando sus oportunidades.

línea por línea, incluso si en este contexto se emplean técnicas que, efectivamente, se conocen como «sistemas de aprendizaje». Pero este «aprendizaje» está tan alejado del aprendizaje humano como el vuelo de los aviones del de los pájaros. Y la inteligencia artificial todavía progresa gracias a los científicos, no por sí sola.

Afirmar que «los algoritmos actuales pueden reconocer la escritura, el habla y los patrones casi tan bien como los seres humanos, e incluso acaban mejor numerosas tareas» es simplemente absurdo. No resulta difícil detallar toda una lista de tareas que supondrían una carga excesiva para cualquier algoritmo y hasta para DeepMind, pero de ningún modo para el ciudadano medio o incluso para un niño.

Los profetas del apocalipsis digital deberían atenerse a afirmaciones con base científica. Aunque hoy en día haya ordenadores capaces de derrotar al campeón del mundo de ajedrez, no dejan de tener la miopía del especialista. ¿O cómo llamaríamos a alguien que juega al ajedrez de manera brillante pero que no es capaz de hacer ninguna otra cosa? Decir que hoy en día los algoritmos saben lo que hacemos, lo que pensamos y lo que sentimos es también, lisa y llanamente, incurrir en una falsedad. Los algoritmos no «saben» nada. Como mucho, son capaces de procesar datos sobre nosotros. Pero hasta qué punto esos datos pueden realmente expresar nuestros actos, pensamientos y sentimientos constituye una cuestión extremadamente compleja. Pero, al menos con el estado actual de la tecnología, los sistemas informáticos están remotamente lejos de conseguir lo que afirma.

APROVECHAR LAS OPORTUNIDADES

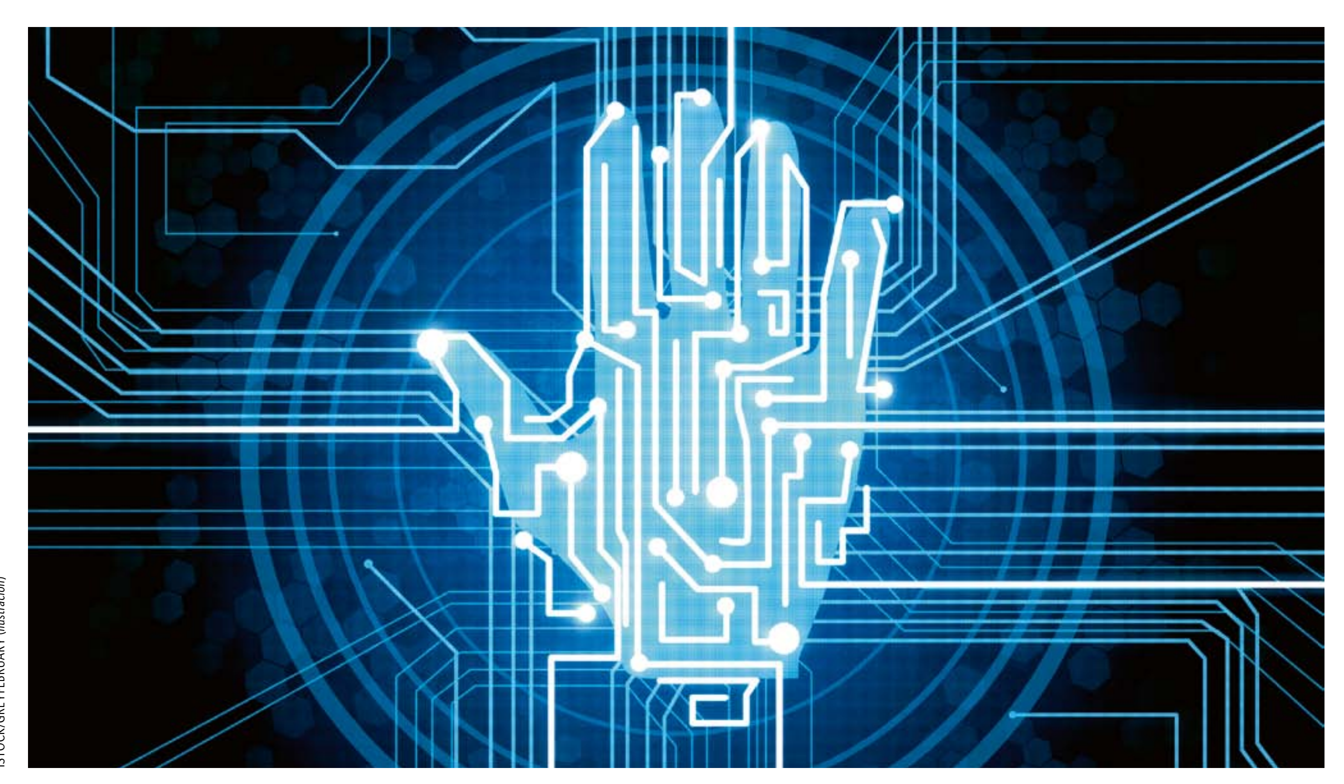
Es interesante la deriva del Manifiesto hacia las catástrofes preprogramadas. Aquí los autores vociferan de forma genérica acerca de la optimización y la complejidad de los problemas. ¿Qué tiene que ver la digitalización con que haya habido psicólogos que en el pasado reciente participasen en escándalos relacionados con torturas? ¿Cómo es que se acusa a la digitalización de la fragilidad de la paz mundial y del cambio climático? No cabe duda de que los ordenadores también consumen energía y contribuyen así a las emisiones de CO_2, pero solo en una pequeña parte.

Si contemplamos nuestro mundo y la tecnología digital en su estado actual, no se aprecia el riesgo de una superinteligencia de ningún tipo; digital, tampoco. Antes bien, uno adquiere la impresión de que, en líneas generales, al mundo no le haría daño un poco más de inteligencia racional.

Con todo, hay un aspecto que resulta indiscutible: la tecnología digital crea nuevas oportunidades, y si dichas oportunidades acaban en las manos equivocadas, pueden ocasionar enormes peligros. Pero, por otro lado, también está claro que el progreso digital es imparable. El aumento exponencial en el rendimiento de los ordenadores aún continuará durante una o dos décadas. Por tanto, la cuestión no es interponerse en el camino de la tecnología digital o condenarla de manera irreflexiva. El reto consiste en configurarla con miras a su aprovechamiento: usarla teniendo en mente a las personas y darle cuerpo sin olvidar nuestros valores. Pero eso solo será posible si juzgamos sus posibilidades de manera realista y las exponemos con acierto.



Manfred Broy es profesor de la Universidad Técnica de Múnich. Investiga en el campo de la modelización y desarrollo de sistemas intensivos en *software* complejos.



ISTOCK/GREYFEBRUARY (*ilustración*)

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



Aerogeneradores verticales

Al contrario que los aerogeneradores clásicos, los de eje vertical pueden funcionar con independencia de la dirección en que sople el viento

Hoy todos estamos acostumbrados a ver gigantescos aerogeneradores cerca de las autopistas o en las cimas de montaña. La mayoría de ellos cuentan con grandes palas que giran en torno a un eje horizontal. Sin embargo, existen también aerogeneradores de eje vertical. Estos ofrecen una interesante alternativa cuando la dirección del viento es incierta o cambiante, como suele ocurrir en los entornos urbanos.

Los aerogeneradores convierten parte de la energía cinética de este en energía eléctrica. En el modelo más extendido, el dispositivo mecánico es una hélice fija sobre un rotor horizontal, instalado en alto para aprovechar vientos más intensos y regulares. Estos dispositivos aprovechan casi el 50 por ciento de la energía cinética del viento que los atraviesa. Ese valor, cercano al óptimo teórico del 60 por ciento, es fruto del compromiso: para obtener la máxima potencia, hay que frenar el viento de forma considerable, pero no en exceso, ya que entonces el caudal de aire disminuye y, con él, también la potencia.

Los aerogeneradores de hélice llenan la mayor parte de los parques eólicos. Sin embargo, no resultan óptimos en todas las situaciones. El mantenimiento de la maquinaria, situada en lo alto, es engorroso. Además, deben estar orientados de cara al viento. Esto se consigue con ayuda de un motor, pero es preferible no cambiar su orientación muy a menudo. Por ello, en presencia de un viento variable, suele optarse por orientar los aerogeneradores de un mismo parque en diferentes direcciones, aun a costa de que los mal orientados permanezcan detenidos.

Rotores Darrieus y Savonius

Los aerogeneradores de eje vertical no presentan ese inconveniente. Los hay de dos tipos: uno de ellos fue patentado en 1927 por el ingeniero y académico francés Georges Darrieus; el otro, en 1929 por el ingeniero finés Sigurd Savonius.

El aerogenerador Savonius es el más sencillo de entender. El dispositivo impulsor lo forman dos cuencos semicilíndricos levemente desalineados. El viento empuja sobre la concavidad del primer cuenco y, luego, al seguir su trayecto, empuja al segundo antes de salir. Dado que los cuencos están desplazados, el viento siempre puede penetrar entre ellos y generar la rotación con independencia de la orientación del aerogenerador.

Al no emplear más que la resistencia aerodinámica, la turbina Savonius presenta la ventaja de generar un par de fuerzas de gran intensidad, con un arranque rápido incluso con un viento débil. Sin embargo, su rendimiento, del orden del 10 por ciento, es muy pobre.

Para mejorarlo, resulta más conveniente recurrir a la fuerza de sustentación que a la de resistencia aerodinámica. Este es el principio en el que se basa la turbina Darrieus. El truco consiste en disponer alrededor del rotor unas palas con un perfil similar al de las alas de los aviones. La fuerza que se ejerce sobre ellas se debe al viento aparente que soporten; es decir, a la suma (vectorial) del viento real y del debido a la rotación del dispositivo.

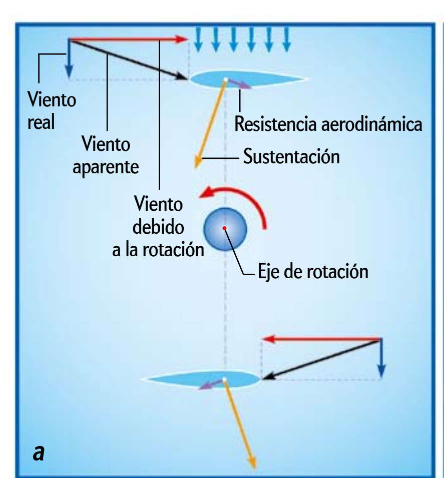
Al girar este, la orientación de la pala varía. Lo mismo ocurre entonces con el viento aparente, tanto en dirección como en módulo, por lo que se genera una fuerza aerodinámica periódica. Esta última se obtiene como la suma de una fuerza de resistencia aerodinámica (el rozamiento que se opone al movimiento), dirigida según el viento aparente, y de una fuerza de sustentación (la debida a la desviación de ese viento por la pala), perpendicular a la anterior.

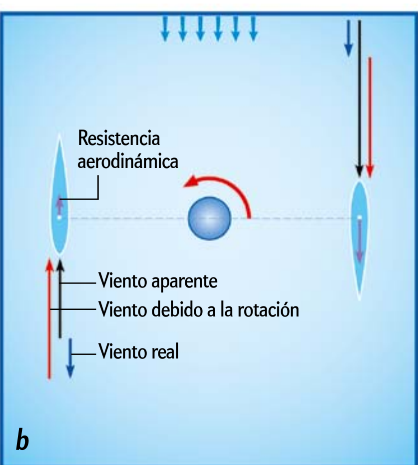
Cuando el viento sopla perpendicular a la pala, el viento aparente lo hace en diagonal, de modo se obtiene una sustentación cuyo par acelera el giro. Al mismo tiempo, sin embargo, la resistencia aerodinámica lo frena. Si la rotación es lo suficientemente rápida, el ángulo de incidencia del viento aparente se verá reducido de manera considerable y la sustentación será entonces mucho mayor que la resistencia aerodinámica. Como consecuencia,



A FAVOR DEL VIENTO: La turbina Darrieus (*izquierda*) usa palas con un perfil similar al de las alas de los aviones. Para reducir al máximo los esfuerzos mecánicos que sufre la pala, esta debe tomar la forma de una troposkina; es decir, la que adopta una cuerda de peso despreciable sometida a rotación rápida (*derecha*).

ILUSTRACIONES DE BRUNO VACARO





TURBINA DARRIEUS: Cuando la pala se encuentra perpendicular al viento (*a*), la sustentación acelera la rotación pese a la resistencia aerodinámica. Cuando se orienta paralelamente a él (*b*), la única fuerza que aparece es la resistencia aerodinámica.





TURBINA MIXTA DARRIEUS-SAVONIUS: En estos aerogeneradores, a las palas de tipo Darrieus se añaden dos dispositivos formados cada uno por dos cuencos semicilíndricos descentrados y enfrentados. El viento, al penetrar entre ambos, crea un par de fuerzas (*rojo*) que hace girar el mecanismo en torno a su eje. A fin de que el viento pueda actuar con independencia de la dirección en que sople, los dos dispositivos se orientan a 90°.

se generará un par de fuerzas neto que acelerará la rotación.

No obstante, cuando la pala se encuentra de cara al viento, también lo está con respecto al viento aparente, por lo que solo aparecerá una resistencia aerodinámica que frenará el rotor. Para estimar las prestaciones totales, hemos de calcular la media de los pares ejercidos por la sustentación y la resistencia aerodinámica a lo largo de una vuelta completa. La experiencia nos enseña que, con un perfil de pala adecuado, el par medio resultante es efectivamente motor. Un viento rotativo entre cuatro y seis veces más intenso que el real permite lograr los mejores rendimientos, con un máximo del 40 por ciento.

Esos efectos desaparecen con una baja rotación o en parada. Una turbina Darrieus de una o dos palas se inmoviliza cuando el viento sopla perpendicular a ella, sin que pueda arrancar por sí sola. Únicamente se consigue un arranque autónomo y trabajoso, cualquiera que sea la posición inicial, con tres palas separadas 120 grados. Esto explica por qué el generador de las turbinas se emplea a veces como motor de arranque. Otra solución consiste en combinar en un mismo eje un dispositivo Savonius, que facilita el arranque autónomo, y una turbina Darrieus, que toma el relevo cuando la rotación es lo bastante rápida.

Una geometría curiosa

La necesidad de obtener una velocidad de rotación alta para lograr un buen rendimiento tiene una consecuencia mecánica inesperada. Imaginemos que una turbina Darrieus de 5 metros de diámetro gira en un viento de 10 metros por segundo. Con un rendimiento máximo, el punto extremo de la pala rotará a unos 50 metros por segundo. A esa velocidad, la aceleración centrípeta alcanzará los 1000 metros por segundo al cuadrado: ¡100 veces la aceleración de la gravedad!

Si esta circunstancia no se tiene en cuenta en el diseño, se corre el riesgo de que las fuerzas centrípetas fatiguen mecánicamente el material de la pala e incluso la rompan. Para evitarlo, en lugar de reforzar la estructura es más sencillo emplear una pala curva. La forma óptima resulta ser la troposkina: la que adopta una cuerda de peso despreciable cuando gira a velocidad constante en torno a un eje al que están sujetos sus extremos. Si la aceleración de la gravedad es mucho menor que la centrípeta, como ocurre en este caso, dicha forma es independiente de la velocidad de rotación.

Esta geometría garantiza que los esfuerzos mecánicos que se ejercen a lo largo de la pala sean solo de tracción y, por tanto, más fáciles de soportar. Sin embargo, el viento relativo depende de la distancia al eje y, por tanto, no es uniforme a lo largo de la pala. Como consecuencia, se crean turbulencias que, a altas velocidades, pueden resultar ruidosas y rebajar el rendimiento. De igual modo, en los dispositivos rígidos de palas rectas verticales, la variación del par de sustentación a lo largo del tiempo generará desagradables vibraciones en la estructura si esta es de gran tamaño.

Por ahora, parece que los fines comerciales de la técnica Darrieus-Savonius se limitan a los aerogeneradores pequeños para instalar en techos o a lo largo de carreteras, donde los vientos son moderados. Sin embargo, existen también algunas aplicaciones curiosas: la empresa china Timar, por ejemplo, fabrica unas farolas híbridas eólico-solares rematadas en lo alto por una turbina vertical de 400 vatios. IyC

PARA SABER MÁS

Development in blade shape design for a Darrieus vertical axis wind turbine. T. D. Ashwill y T. M. Leonard en *Sandia Report SAND86-1085*, septiembre de 1986.

Self-starting capability of a Darrieus turbine. R. Dominy et al. en *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers A: Journal of Power and Energy*, vol. 221, n.º 1, págs. 111-120, 2007.

EN NUESTRO ARCHIVO

El futuro de la energía eólica. Gerhard Samulat en *IyC*, junio de 2012.

por Francine F. Abeles



Francine F. Abeles es profesora emérita de matemáticas y ciencias de la computación de la Universidad Kean, en Nueva Jersey.

El legado matemático de Lewis Carroll

Un siglo y medio después de la publicación de *Alicia*, las obras matemáticas de su autor siguen asombrando por su riqueza y originalidad

En 1855, Charles Lutwidge Dodgson (1832-1898) comenzó a enseñar matemáticas en el Christ Church College de la Universidad de Oxford. Su trabajo consistía en preparar a los hombres de la institución (pues todos eran varones) para los exámenes de la materia. Bajo el pseudónimo de Lewis Carroll, Dodgson publicó *Las aventuras de Alicia en el país de las maravillas* en 1865, hace ahora 150 años, y *A través del espejo* en 1871. Sin embargo, fue también autor de numerosos trabajos y de hasta diez libros de matemáticas.

En algunos de ellos expuso métodos inusuales, como trucos aritméticos y de cálculo mental rápido. En otros presentó ideas innovadoras que presagiaron avances que solo verían la luz en el siglo xx, como su teoría de los sistemas electorales. Con excepción de dos de esos libros, sus obras fueron publicadas por la editorial Macmillan. Uno de sus fundadores, Alexander Macmillan, fue durante 35 años amigo y editor de confianza de Dodgson.

Lo que unifica la obra de Carroll es el humor y colorido con que adornaba las distintas manifestaciones de sus amplios intereses matemáticos, sobre todo en geometría y en lógica. Los libros de Alicia abundan en ejemplos sobresalientes. En el capítulo «Una merienda de locos», por ejemplo, la Liebre de Marzo, el Sombrerero, el Lirón y Alicia giran alrededor de la mesa del té e intercambian sus asientos, una situación que remeda la aritmética modular, con los números situados en un círculo en vez de en una línea. Carroll concibió el primer uso moderno de los actuales árboles lógicos, una técnica gráfica para determinar la validez de argumentos complejos que bautizó como «método de los árboles». Con ello, contribuyó al desarrollo de métodos automáticos para resolver problemas lógicos enmarañados. Fiel a su estilo, los enigmas que Carroll soluciona con sus árboles toman nombres extravagantes, como «El problema de los tenderos en bicicletas» o «El problema de los cerdos y los globos».



LEWIS CARROLL en 1863.

WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO

Creador de acertijos

Las diez historias matemáticas y llenas de humor que componen su libro *Un cuento enmarañado* aparecieron primero en forma de entregas publicadas entre 1880 y 1885 en la revista *The Monthly Packet*. Carroll las llamó «nudos» (*knots*) para reflejar la dificultad de los uno, dos o tres problemas que incluían. En el número siguiente indicaba su resolución y comentaba las respuestas que había recibido de los lectores, presentadas a menudo de forma jocosa (www.onlinemathlearning.com/tangled-tale.html). *Un cuento enmarañado* se convirtió en la obra favorita de J. Willard Gibbs (1839-1903), el químico-físico y matemático aplicado a quien Albert Einstein calificó como «la mente más brillante de la historia estadounidense».

Carroll creía que, además de entretener, los rompecabezas y pasatiempos lógicos infundían en quienes los resolvían una sensación de logro. Y eso, opinaba, les enseñaba a analizar cualquier cuestión con claridad y, más importante aún, a detectar y desmontar falacias. En *Alicia en el país de las maravillas* Carroll hace juegos de palabras sobre otros «nudos». En el capítulo 3, por ejemplo, el Ratón está contando un cuento que, en el texto, aparece escrito en forma de serpentina, como si se tratase de una cola (un juego que en inglés permite la homofonía de *tale* y *tail*, «cuento» y «cola»). Alicia hace un comentario sobre la quinta curva del cuento y el Ratón contesta gritando: «¡No!». La siempre curiosa aventurera de Carroll malinterpreta la res-

puesta y exclama: «¡Un nudo!» (en inglés, las palabras *not* y *knot*, «no» y «nudo», también se pronuncian igual). Siempre dispuesta a mostrarse servicial, Alicia dice mirando ansiosa a su alrededor: «¡Ah, deja que te ayude a deshacerlo!».

Por supuesto, Carroll era un devoto de la enigmística, como revela casi cualquier página de *Alicia* y de *Un cuento enmarañado*. Entusiasta de los acrósticos, dedicó este último, publicado en forma de libro en 1885, a su amiga y alumna Edith Rix, de 19 años de edad. La dedicatoria consiste en un poema en el que puede leerse su nombre a partir de la segunda letra de cada verso:

*B**e**loved Pupil! Tamed by Thee,*
*A**d**dish=, Subtrac=, Multiplica=tion,*
*D**i**vision, Fractions, Rule of Three,*
*A**t**test thy deft manipulation!*
*T**h**en onward! Let the voice of fame*
*F**r**om Age to Age repeat thy story,*
*T**i**ll thy hast won thyself a name*
*E**x**ceeding even Euclid's glory!*

(Que podría traducirse como: *¡Amado Alumno! ¡Domesticadas por Vos, / Suma=, Resta=, Multiplica=ción, / División, Fracciones, Regla de Tres / dan fe de vuestra hábil manipulación! / ¡Adelante, entonces! ¡Dejad que la voz de la fama / de Época en Época repita vuestra historia, / hasta que os hayáis ganado un nombre / que supere incluso la gloria de Euclides!*)



ILUSTRACIÓN de «Una merienda de locos», tercer capítulo de *Alicia en el país de las maravillas*.

Aritmética, votaciones y lógica

En los últimos años de su vida, Carroll publicó tres artículos en *Nature*. El primero versaba sobre un método para encontrar el día de la semana para cualquier fecha. Carroll, que sentía fascinación por los métodos de cálculo mental, escribió en la presentación de la nota que él mismo no era rápido calculando, pero que había podido resolver diez de tales problemas en menos de cuatro minutos. Su método requería hacer cuatro cálculos con números enteros: dos a partir del año, otro a partir del mes y un último con el día.

En una era anterior a las calculadoras, los cálculos aritméticos eran onerosos y propensos a errores. En su segundo artículo, firmado esta vez con su verdadero nombre y titulado «Un método breve para dividir un número dado entre 9 u 11», Carroll resumió su trabajo sobre simplificación de cálculos corrientes, que también incluía la división entre 13, 17, 19 y 41, así como entre números que distasen 10 unidades o menos de una potencia de 10. Por último, el artículo «División larga abreviada» es, según él mismo escribe, un desarrollo de ideas propuestas por otros. Con todo, este trabajo reviste interés desde el punto de vista del cálculo moderno, ya que pone énfasis en la necesidad de minimizar el número de pasos de un algoritmo.

Carroll no influyó en el desarrollo de las ideas matemáticas de su tiempo. Sin embargo, a partir de la segunda mitad del siglo xx, sus contribuciones a la teoría de los sistemas electorales fueron descubiertas en tres trabajos que había escrito entre 1874 y 1876. El tercero de ellos, titulado «Un método para realizar votaciones sobre más de dos asuntos», es el que reviste mayor importancia. Carroll fue el primero en concebir un sistema de votación que permitiese una representación biproporcional; es decir, proporcional con respecto a la población de cada distrito y también en el reparto de escaños de los partidos. A pesar de la amistad de Carroll con Lord Salisbury, primer ministro del Reino Unido en aquel entonces, su método no llegó a aplicarse por razones políticas. Hoy, el Parlamento Europeo emplea una forma de representación proporcional.

El trabajo de Carroll en lógica adelantó resultados que no aparecerían hasta cien años más tarde; sobre todo, en la segunda parte de su libro *Lógica simbólica*, la cual Carroll nunca publicó en vida. Es este volumen el que contiene el método de los árboles. Perdido durante largo tiempo, fue presentado al público por el filósofo W. W. Bartley en *Scientific American* en 1972. El libro de Carroll sobre álgebra lineal, *Tratado elemental sobre determinantes, con su aplicación a las ecuaciones lineales simultáneas y a la geometría algebraica*, es también muy innovador. Su método de «condensación» para calcular determinantes desencadenó la investigación que, en los años ochenta del siglo xx, daría lugar a la formulación de la conjetura de la matriz de signo alternante, de David Robbins y Howard Rumsey. Su famoso problema lógico «Lo que la tortuga le dijo a Aquiles», publicado en 1895 en la revista filosófica *Mind*, permanece aún sin resolver. Y, en 1858, creó el primer código criptográfico matricial basado en la aritmética modular, cuya publicación tardaría más de cien años en ver la luz.

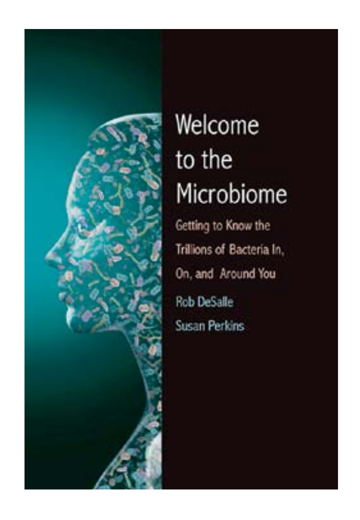
Como matemático, lógico, escritor y fotógrafo innovador, Lewis Carroll creó un vívido tapiz de trabajos y presagió muchos de los desarrollos del siglo xx. Sin embargo, a pesar de toda la complejidad y sentido lúdico de este maestro del juego, en toda su obra, desde la teoría de los sistemas electorales hasta su gran creación, *Alicia*, sus profundas preocupaciones fueron siempre la ecuanimidad, la certeza y la verdad.

Artículo original publicado en *Nature* 527, págs. 302-304, 2015.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2016

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

To find the day of the week for any given date. Lewis Carroll en *Nature*, vol. 35, pág. 517, marzo de 1887.
What the tortoise said to Achilles. Lewis Carroll en *Mind*, vol. 4, págs. 278-280, abril de 1895.
Brief method of dividing a given number by 9 or 11. Charles L. Dodgson en *Nature*, vol. 56, págs. 565-566, octubre de 1897.
Abridged long division. Charles L. Dodgson en *Nature*, vol. 57, págs. 269-271, enero de 1898.
Lewis Carroll's lost book on logic. W. W. Bartley III en *Scientific American*, vol. 227, págs. 38-46, julio de 1972.
The mathematical pamphlets of Charles Lutwidge Dodgson and related pieces. Francine Abeles. Lewis Carroll Society of North America, 1994.
Alicia anotada. Edición de *Alicia en el país de las maravillas* comentada por Martin Gardner. Akal, 1998 (2.ª edición).



WELCOME TO THE MICROBIOME
GETTING TO KNOW THE TRILLIONS OF BACTERIA AND OTHER MICROBES IN, ON, AND AROUND YOU
Rob DeSalle y Susan L. Perkins.
Yale University Press, 2016.

Microbioma

Compañeros inseparables e imprescindibles

Hay más microorganismos en nuestro interior que estrellas tachonan la Vía Láctea. Astronómica es también su diversidad, con la peculiaridad de que las microbiotas que nos acompañan en nuestros primeros años varían de las presentes en nuestra edad adulta. El estudio de las interacciones entre microorganismos y cuerpo humano configura una nueva rama de la ciencia que está experimentando un espectacular desarrollo y de la que se espera que revolucione la medicina. De ella se ocupa el libro.

Se pone el foco sobre las comunidades microbianas, y sus genes, que viven en el organismo: el microbioma. Guarda este una relación estrecha y compleja con procesos biológicos básicos del ser humano (digestión, crecimiento e inmunidad). A la manera de los ecosistemas avanzados, esa constelación de microorganismos pertenece a especies que cumplen diferentes funciones [*véase* «El ecosistema microbiano humano», por Jennifer Ackerman; Investigación y Ciencia, agosto de 2012; *y* «Nuestro segundo genoma», por Francisco Guarner; Investigación y Ciencia, diciembre de 2012]. Cuando una especie crítica inicia su declive, arrastra consigo a todo el ecosistema; pensemos en la relación del cuerpo humano con *Helicobacter pylori*, responsable de las úlceras pépticas, o en la vinculación de la obesidad con la flora bacteriana del tracto gastrointestinal.

De la mano de Rob DeSalle y Susan Perkins vamos recorriendo los distintos hábitats de nuestro cuerpo que dan cobijo a los microorganismos, billones de bacterias y otros microorganismos instalados en la piel, la boca, las zonas genitales y, sobre todo, los intestinos. Los humanos no son islas fisiológicas que regulen su propio funcionamiento interno. La mayoría de las células de nuestro cuerpo no son humanas. Las colonias que residen dentro del tracto gastrointestinal ejercen efectos de largo alcance sobre la salud. Los autores detallan el proceso entero de evolución y la bioquímica de las interacciones.

Sin microbioma, ni plantas ni animales sobrevivirían. Pese al puesto central que ocupan en la vida de la Tierra, sabemos muy poco sobre los mecanismos de interacción de los microorganismos entre sí, con quienes les dan hospedaje y con su entorno. Aunque las técnicas de secuenciación de ADN han permitido una nueva visión de la ubicuidad y diversidad de los microorganismos, arrojan escasa luz sobre la función y dinámica de la comunidad. Podemos caracterizar cientos de muestras a la vez, pero se echa a faltar una comprensión sistemática de lo que determina la diversidad y composición del microbioma.

Una diferencia importante entre macro- y microorganismos estriba en la capacidad de transferencia génica horizontal de estos últimos. Diferentes personas pueden presentar especies microbianas distintas, pero cada individuo tiende a portar el mismo conjunto clave de especies en el curso de largos períodos. Cada especie de bacteria comensal presenta una característica distintiva: la versión única de un gen (el gen del ARN ribosómico 16S) que codifica cierta molécula de ARN en los ribosomas. Todos los humanos poseemos un microbioma desde muy temprana edad, aunque nazcamos sin él. Cada individuo adquiere del entorno su propia comunidad de comensales.

Los autores introducen el tema desde una perspectiva evolutiva y subrayan que nuestra especie ha tenido a los microorganismos por compañeros de viaje en su larga prehistoria. El antepasado común de toda vida celular, humana y microbiana, apareció hace unos 3500 millones de años en forma de microorganismo unicelular sin membrana nuclear que encerrase el material genético. Hará unos mil millones de años, ese precursor adquirió una membrana nuclear. Su trayectoria evolutiva había divergido de todos los demás microorganismos unicelulares. Muchos linajes se extinguieron. Otros sobrevivieron; entre ellos, el que conducía a nosotros. Se produjo una eclosión de vida multicelular de complejidad creciente. Hubo un aspecto, sin embargo, que no cambió: los microorganismos unicelulares prosiguieron en larga asociación con criaturas multicelulares.

Hace cien millones de años, nuestro antepasado era un micromamífero que convivía con dinosaurios, colonias de insectos y plantas. Y, sobre todo, con numerosas especies de microorganismos. Más tarde, hace diez millones de años, nuestro antepasado era ya un primate, refugio de innumerables microorganismos instalados en su tracto gastrointestinal, repliegues, cavidades y superficie pilosa. Hace un millón de años, nuestros antepasados deambulaban erguidos y habían perdido parte de su protección pilosa, pero seguían viviendo con numerosos microorganismos en su interior. Había unas seis especies de humanos que caminaban erguidos; cada una presentaba su propio cuadro de microorganismos en coevolución con ella. Hasta hace unos cien años no empezamos a vislumbrar el mundo escondido de los microorganismos. Se disponía de vacunas para determinadas enfermedades, Louis Pasteur había desarrollado métodos de esterilización y Robert Koch había descrito la forma en que los microorganismos causan infecciones.

Hasta hace solo unas tres décadas, los científicos creían erróneamente que había dos tipos básicos de células en el planeta: procariotas (organismos sin membrana nuclear) y eucariotas (organismos con membrana nuclear). En los ochenta del siglo pasado, Carl Woese estableció la existencia de tres clases principales de células: arqueobacterias, eucariotas y bacterias. Hace algo más de diez años, en torno al cambio de milenio, el legado de Pasteur y Kock eclosionó en un nuevo campo científico de enorme potencia. Se impusieron los antibióticos, antivirus y minuciosos análisis clínicos de microor-

ganismos. Se había descifrado la estructura del ADN y del código genético. Por si eso no fuera bastante, hay que pensar en los virus. Entre los de tamaño menor se cuentan los virus de la gripe, con ocho genes, y los papilomavirus, causantes del cáncer cervical, que constan también de ocho genes. En el extremo opuesto, los *Mimivirus* alcanzan hasta el millar de genes. Por no mencionar el *Pandoravirus*, con 2200 genes, más que algunas bacterias y arqueobacterias. Gracias a los virus se secuenciaron los primeros genomas enteros de microorganismos [*véase* «Un siglo de bacteriófagos», por Forest Rohwer y Anca M. Segall, *en este mismo número*].

—Luis Alonso



DEL ELECTRÓN AL CHIP

Gloria Huertas, Luisa Huertas y José L. Huertas.
Los Libros de la Catarata - CSIC, 2015.

Nuestro momento histórico

La evolución tecnológica podría definir el momento histórico que estamos viviendo

¿Quiere saber la historia que hay detrás del dispositivo con el que posiblemente esté leyendo esto? ¿Quiere conocer a los protagonistas del desarrollo de la tecnología actual? En ese caso, *Del electrón al chip* es su libro.

La obra supone un repaso a la historia de la tecnología moderna. Desde el punto de vista del corazón de todo aparato electrónico a nuestro alcance, este no es otro que el transistor. Pero el libro no olvida sus antecedentes, como las válvulas de vacío, e incluso repasa la historia de los protagonistas que llevaron al descubrimiento del electrón.

El libro, dividido en 11 capítulos, comienza con los primeros experimentos que se llevaron a cabo para entender qué era el electromagnetismo. Es realmente curioso que, aun sin comprender muy bien qué era, e incluso sin conocer todavía el electrón, el fenómeno ya se explotase de manera comercial, sobre todo con la iluminación, la cual comenzó a finales del siglo XIX.

Una vez explicado el establecimiento del electromagnetismo por parte de grandes científicos como Faraday o Maxwell, se realiza un repaso de la evolución de las comunicaciones, así como de la aparición de la radio y de las telecomunicaciones sin cables.

Si estos capítulos iniciales son fascinantes, a partir del capítulo 6 comienza la alucinante historia del transistor, una historia que debería conocer todo el mundo. En estos capítulos se introduce al lector en la tecnología que hay detrás de la miniaturización de los componentes electrónicos, clave para entender el desarrollo tan rápido que ha tenido la tecnología actual. Porque, como muy bien indican los autores, lo que hoy es normal era auténtica ciencia ficción hace 60 años. ¿Se imagina almacenar vídeos con discos magnéticos de 1,4 Mb o navegar por YouTube con su viejo módem a 14.400 bits por segundo? (Y de esto no hace 60 años, sino menos.)

Tampoco falta un último capítulo dedicado al futuro de la tecnología, ya que la conocida como ley de Moore (la ley empírica que afirma que el número de transistores se duplica aproximadamente cada dos años) está llegando a su límite [*véase* «Más allá de la ley de Moore», por John Pavlus; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2015]. En este capítulo se presentan los problemas a los que se enfrenta el desarrollo tecnológico y se proponen algunas soluciones.

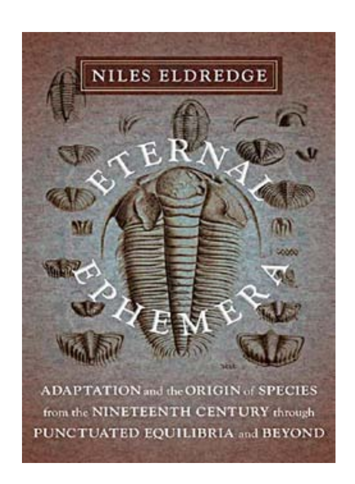
El libro es un recorrido fascinante por el desarrollo del *hardware* que soporta toda esta tecnología a la que tan acostumbrados estamos actualmente y que ha supuesto un gran impacto social, quizá más incluso del que somos conscientes. Citando a los autores: «La electrónica ha evolucionado en algo más de cien años hasta trascender su papel como ciencia y tecnología y convertirse en una seña de identidad del momento histórico presente. Esto lo ha conseguido para proporcionarnos una extraordinaria capacidad de comunicación y unas enormes posibilidades de cómputo, todo ello puesto al alcance de nuestra mano en forma de terminales muy accesibles y manejables».

En definitiva, un libro bien estructurado que, en cuanto a divulgación, tiene varios niveles de lectura. El lector formado en estos temas encontrará multitud de detalles históricos interesantes, además de entender más profundamente algunos pasajes del libro y de visualizar la dificultad del desarrollo de la tecnología. Para el no iniciado, se le ofrecerá un marco perfecto para entender el momento histórico presente y cómo se ha llegado hasta él, sin olvidar que conocerá a prácticamente todos los personajes históricos clave que han hecho posible que lleve en su bolsillo un instrumento capaz de comunicarle con cualquier parte del mundo y de mostrarle la información que necesite esté donde esté.

Según los autores, su intención era la siguiente: «Hemos pretendido dar una idea de la evolución histórica de la electrónica, una ciencia-fenómeno que ha crecido casi con nosotros, impactando decisivamente en nuestros modos de vida, pese a lo cual es poco conocida». Este objetivo creo que se ha cumplido con creces.

Se trata de un libro muy fácil de leer, con profusión de notas y referencias que harán las delicias de aquel que quiera profundizar en alguno de los puntos tratados. Además, como hemos comentado, permite una lectura a varios niveles de profundidad dependiendo del nivel de conocimientos del lector, algo muy de agradecer.

—Francisco Javier Martínez Guardiola
Instituto Universitario de Física Aplicada a las Ciencias y las Tecnologías, Universidad de Alicante



ETERNAL EPHEMERA
ADAPTATION AND THE ORIGIN OF SPECIES FROM THE NINETEENTH CENTURY THROUGH PUNCTUATED EQUILIBRIA AND BEYOND
Niles Eldredge. Columbia University Press, 2015.

Darwiniana

Teorías que conformaron la biología evolutiva

Juego de paradojas a propósito del concepto biológico de especie en el título de este libro, *Eternal ephemera*. Juego aparente, pues las especies que se dirían eternas en su naturaleza son en realidad efímeras. Todos los organismos y todas las especies son temporales, pero la vida perdura. Del origen, evolución y extinción de las especies —interconectadas en la red de la vida como «efímeros eternos»— se ocupa la biología evolutiva. Pero ¿nacen y mueren, aparecen y se extinguen en verdad? No es cuestión baladí. De hecho, constituye el centro de la inquisición biológica desde hace más de 150 años.

Niles Eldredge, paleontólogo adscrito al Museo Americano de Historia Natural, autor de *Life in the balance* (Princeton University Press, 1998), *The pattern of evolution* (W. H. Freeman, 1999), y *The triumph of evolution... and the failure of creationism*, (W. H. Freeman, 2000), escribe ahora un viaje autobiográfico sobre la evolución del concepto de evolución. Con Stephen Jay Gould esbozó la teoría del equilibrio puntuado, avanzada a comienzos de los setenta. De una manera sumaria, esa hipótesis sugiere que las especies se transforman muy poco en el curso de su existencia (tiempo medido a escala geológica), pero, cuando se produce el cambio, este acontece muy rápidamente y despliega ramas del árbol evolutivo con brote de especies nuevas. Integra la teoría de la especiación geográfica con la explicación empírica de la estasis. (La estasis es la pauta común, predominante, de estabilidad de las especies que sobreviven a lo largo de períodos prolongados una vez han aparecido en el registro fósil.)

La hipótesis del equilibrio puntuado abrió el acceso a las discontinuidades en la evolución. Darwin, partidario de que *natura non facit saltum*, afirmaba que la evolución constituía un proceso continuo. La biología molecular ofrece, sin embargo, numerosos ejemplos en los que un solo cambio de una base de un gen o algunas mutaciones bastan para transformar drásticamente las propiedades de la proteína codificada. El cambio de un solo aminoácido en el canal de sodio puede aportarle al pez globo resistencia ante una de las toxinas más poderosas, la tetrodotoxina de origen bacteriano.

A los orígenes de la realidad de la evolución se aproximaron Georges-Louis Leclerec, conde de Buffon (1749-1804), y su *Histoire naturelle, générale et particulière, avec la description du Cabinet du Roi*, la cual influyó en Georges Cuvier y Jean-Baptiste Lamarck. De interés también fue la *Zoonomia* (1794-1796) de Erasmus Darwin, introductor del concepto de selección natural. En el trasfondo, la sombra de Isaac Newton y su defensa de las causas naturales para explicar los fenómenos naturales. Los primeros evolucionistas buscaban una explicación causal natural para el origen de las especies actuales. Lamarck abordó en 1801 la relación entre conchas fósiles y las especies actuales emparentadas y presentó la primera hipótesis sobre el mecanismo de especiación: la transformación evolutiva. En el sistema de Lamarck, las especies no se extinguen, se transforman paulatinamente a través de las progenies hasta alcanzar los biota modernos.

En 1814, el geólogo italiano Giambattista Brocchi publicó una interpretación diferente sobre el origen de las especies. Sostenía que estas eran como los individuos, sujetas a una explicación causal natural de su nacimiento y muerte. Las especies aparecían y desaparecían como reflejos de hechos discretos; las descendientes sustituían a las precedentes, asemejándose cada vez más a las actuales.

Para Lamarck, la vida era un progreso continuo desde un progenitor simple hacia estadios de creciente complejidad; cada grupo de organismos recorría su propia trayectoria evolutiva, en constante transformación. Las especies constituían meras instantáneas arbitrarias de algo que se encuentra en camino de convertirse en otro ser; si parecen estables, se debe al carácter incompleto del registro fósil. Para Brocchi, las especies nacían y morían para ser remplazadas por otras nuevas. En este caso, el registro fósil se percibe como un reflejo preciso de la especie que llega y desaparece en virtud de la especiación y de la extinción, pero que apenas cambia en el transcurso del tiempo. (La pauta general de la progresiva modernización de la fauna fue reconocida por los primeros naturalistas, incluidos a los que se oponían a una explicación evolutiva, como Cuvier.)

Lamarck y Brocchi desarrollaron sus ideas iniciales a través de estudios sobre moluscos fósiles del Cenozoico, de hace unos 65 millones de años. El advenimiento de la fauna moderna, contemplada como la sustitución de especies dentro de géneros en los moluscos marinos, fue la cuna donde nacieron los rudimentos de la teoría evolutiva. Charles Lyell estimó, en su segundo volumen de los *Principles of geology* (1832), que las especies se originaban y extinguían a una tasa del uno por ciento. No era la suya una perspectiva filogenética. Pensaba que no podía aparecer una especie de carnívoro nueva hasta que se desarrollase la especie de presa.

En Edimburgo, en la década de 1820, merecieron atención las ideas de Lamarck y de Brocchi. El debate apareció en el *Edinburgh New Philosophical Journal*. La geología inglesa advirtió el gradiente de formas fósiles progresivamente más cercanas a las existentes y no se mostraba renuente a aceptar la tesis transformista. En 1825, Robert Grant y Robert Jameson enseñaron la nueva doctrina al joven Darwin, alumno de medicina. Con ese bagaje, zarpó en 1831 a bordo del *Beagle*.

El aprendizaje del análisis científico, historia natural y pensamiento transformista lo continuó Darwin en Cambridge, donde terminó su educación formal a finales del decenio de 1820. Allí conoció el libro de John Herschel *Preliminary discourse on the study of natural philosophy*, que abundaba en la idea newtoniana de buscar explicaciones naturales a los fenómenos naturales. Darwin declaró que esa obra y *Travels to the equinoctial regions of the New Continent* (1819-1829), de Von

Humboldt, fueron las que le indujeron a consagrarse a la ciencia.

A través de notas geológicas, notas zoológicas, diarios y cartas enviadas a su profesor de botánica, John Stevens Henslow, y a miembros de su familia desde el *Beagle*, emerge un cuadro de las posibilidades de la transformación desde sus experiencias formativas iniciales con los fósiles y especies vivas que encontró.

Darwin pensaba que había hallado pruebas de la sustitución de una especie extinta cuya descendencia seguía viviendo en América del Sur. Entonces comienza a entender la sustitución geográfica como intrínsecamente aliada de las especies en los biota modernos. Patrick Matthew, interesado en las extinciones en masa, indicó a Darwin y a Alfred Russel Wallace la potencia de la selección natural. (Wallace no recibe la atención que merece, no menor que la de Darwin.) El trabajo de Wallace en el archipiélago de Malaya va asociado a la distribución geográfica de especies, aislamiento insular crítico para que una población separada evolucione hacia especies diferentes.

En 1834, en las Malvinas, y sobre todo en 1835, en las Galápagos, Darwin observa pautas de sustitución de especies continentales por isleñas. Recoge pruebas de la sustitución de especies fósiles y su parecido creciente con las especies vivas. Una vez entró en juego la adaptación con los cuadernos de viaje de Darwin sobre la transmutación, avanzados los años treinta, la cuestión pasó a ser: ¿qué relación existe entre el origen de las especies y el cambio adaptativo promovido por la selección? ¿Son las nuevas especies un subproducto del cambio evolutivo adaptativo? Darwin vincula la adaptación con dos escenarios: especiación en aislamiento, por un lado, y cambio gradual progresivo, por otro. Al optar, toma por regla general el cambio gradual evolutivo.

En su *Ensayo* de 1844, Darwin ciñe ya el aislamiento geográfico a las islas. En 1859 abre el *Origin of species* con esas pautas. Parte de las palomas y otras especies domésticas como ejemplos claros de que había una fuerza selectiva que causaba cambios en la forma, color y conducta de los animales. Las especies acometían cambios constantes en el tiempo. ¿Cómo acontecía la especiación?

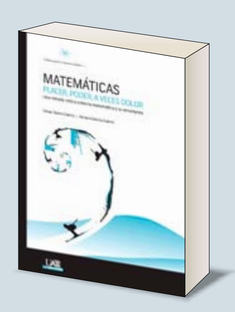
Las respuestas configuraron la biología de comienzos del siglo xx. La teoría de la mutación de Hugo de Vries proponía explicar la especiación como el producto de un cambio genético rápido durante períodos de mutación. Esa fue la idea inspiradora del trabajo de Thomas Morgan en Columbia y de la fundación del laboratorio de Cold Spring Harbor. En 1935, Theodosius Dobzhansky sugería que la evolución había dependido de la discontinuidad en mayor medida que de la continuidad. Dobzhansky y Ernst Mayr resaltaron la función determinante de la especiación geográfica.

La importancia del aislamiento geográfico fue recuperada por Dobzhansky en un breve artículo publicado en 1935, seguido, dos años más tarde, de *Genetics and the origin of species*, donde la teoría de la especiación alcanza un rango en el pensamiento evolutivo moderno. Dobzhansky tomó la existencia de las especies al pie de la letra. Afirmaba que las mutaciones en los organismos producen discontinuidades: formas alternativas discretas, o alelos. Pero, en las poblaciones, la continuidad es la regla; las frecuencias alélicas en el seno de las poblaciones pueden ser gradualmente modificadas entre generaciones a través de la selección natural y la deriva genética. Dobzhansky opinaba que, mientras que cierta variación es necesaria dentro de una especie para mantener la flexibilidad, para evitar la extinción deberán cambiar las condiciones ambientales; los organismos se hallan adaptados a un conjunto de condiciones ambientales característico de cada especie. Cinco años después, Mayr, quien sostenía que las especies eran entidades reales, ponía en primer plano, en *Systematics and the origin of species,* la especiación alopátrica; la especiación geográfica ocupaba el corazón del proceso evolutivo.

En los años setenta se había impuesto el concepto de evolución como un proceso de cambio adaptativo a través de la selección natural a lo largo de períodos geológicos. La versión final de la hipótesis del equilibrio puntuado se redactó en 1972. Se funda en dos pautas empíricas: la sustitución de especies geográficas en los biota vivos y la estasis. Estasis es la observación de que las especies parecen ser bastante estables, a menudo durante millones de años. No había indicios claros del cambio lento y constante que Darwin había supuesto. La estasis constituía la refutación empírica de que la mayoría de los cambios evolutivos se fueran acumulando lentamente en el tiempo. Los teóricos del equilibrio puntuado atienden a la especiación geográfica como el campo donde puede darse la selección generadora de cambio adaptativo.

—Luis Alonso

NOVEDADES



MATEMÁTICAS: PLACER, PODER, A VECES DOLOR
UNA MIRADA CRÍTICA SOBRE LA MATEMÁTICA Y SU ENSENANZA
César Sáenz Castro y Xenaro García Suárez
UAM Ediciones, 2015
ISBN: 978-84-8344-491-7
264 págs. (17,10 €)



LA COCINA DEL FUTURO
COCINA, CIENCIA Y SALUD
Pere Castells
Tibidabo Ediciones, 2016
ISBN: 978-84-9117-203-1
264 págs. (17 €)



SIETE BREVES LECCIONES DE FÍSICA
TODO LO QUE NECESITAS SABER SOBRE FÍSICA, EL UNIVERSO Y NUESTRO LUGAR EN EL MUNDO, EN SIETE BREVES LECCIONES
Carlo Rovelli
Anagrama, 2016
ISBN: 978-84-339-6400-7
104 págs. (12,90 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Abril 1966

Tecnología y empleo

«Según la Comisión Nacional para la Tecnología, la Automatización y el Progreso Económico, la "inmensa mayoría" de la gente reconoce que el cambio tecnológico "ha supuesto una mejora de las condiciones de trabajo al eliminar un gran número, o acaso la mayor parte, de las labores más sucias, bajas y serviles. Quizá la [preocupación] que más haya influido en el dictamen de la Comisión haya surgido de la creencia de que el cambio tecnológico sea una causa primordial de desempleo, el cual podría acabar eliminando casi todos los puestos de trabajo. Los miembros de la comisión, por su parte, concluyeron "que la tecnología elimina puestos de trabajo, pero no trabajo".»

Cosmología de rayos X

«Las dos primeras fuentes de radiación X exteriores a nuestra galaxia han sido descubiertas en los datos obtenidos hace un año mediante un detector de rayos X a bordo de un cohete. Los descubridores de las dos nuevas fuentes, del Laboratorio de Investigación Naval de EE.UU., han identificado que coinciden con dos de las galaxias radioemisoras más potentes, designadas, respectivamente Cisne A y M87. La radiación X procedente de ambas parece ser de diez a cien veces más intensa que la energía que emiten en forma de ondas lumínicas y de radio. Como la atmósfera terrestre es esencialmente opaca a los rayos X del espacio, el instrumental se coloca por encima de la mayor parte de la atmósfera mediante cohetes Aerobee disparados desde el Polígono de Ensayos de White Sands, en Nuevo México.»



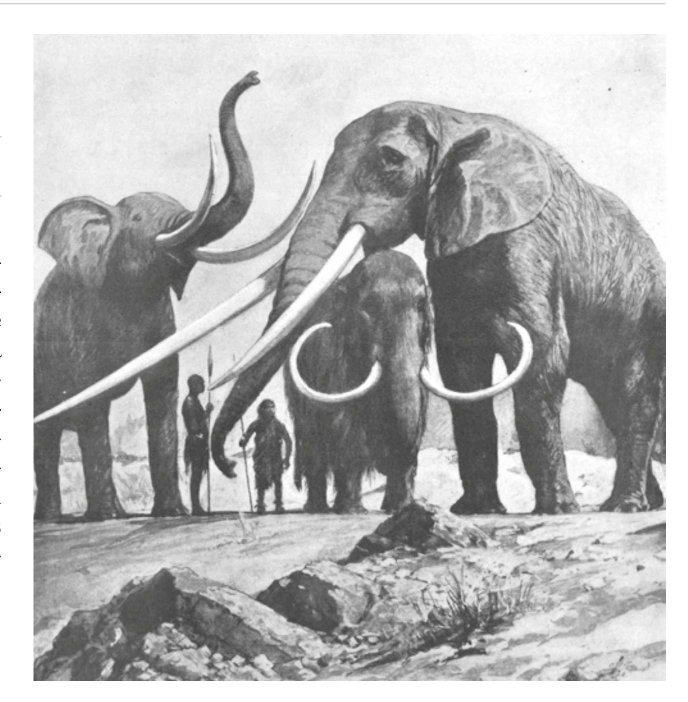
Abril 1916

Deportes para invidentes

«Nunca hasta el presente ha adquirido tan enormes dimensiones el problema de encontrar empleos para los invidentes, cuando la guerra europea ha aumentado en decenas de miles el ya crecido número de esos infortunados. Recientemente, no obstante, los franceses se han comprometido también en la empresa de crear entretenimientos para los desprovistos de visión, entre ellos la esgrima. Para la mentalidad común es difícil concebir de qué modo una persona carente de visión pueda disfrutar de un deporte tan movido como este. Pero ahora, en París, son habituales los torneos de esgrima exclusivos para invidentes.»

Los elefantes más grandes

«Hace tres o cuatro años, un grupo de los Ingenieros Reales se hallaba cavando una trinchera en la ribera del Medway, en Upnor, frente al astillero de Chatham. Dieron así con un número de huesos y un colmillo de gran tamaño. Pero hasta el verano de 1915 no fue posible rematar la recuperación de esos restos. Los huesos de las extremidades de *Palaeoloxodon antiquus*, elefante de colmillos rectos, ofrecen una prueba muy convincente acerca de las dimensiones de aquel animal, que debieron ser tremendas. Se calcula, desde luego, que su altura (*véase la ilustración*) tuvo que alcanzar al menos los 4,5 metros, que supera largamente la de cualquier otra especie viva o extinta.»



EN ESTA CREACIÓN ARTÍSTICA DE 1916, un gigantesco *Palaeoloxodon antiquus* de colmillos rectos se codea con un mamut y un elefante africano.



Abril 1866

Papel y madera

«Se nos informa que la fábrica Manayunk Pulp Works, en Filadelfia, ha sido terminada en el mes en curso. Se trata sin duda de la mayor planta fabril de su clase en el mundo, capaz de producir de doce a quince toneladas de pulpa al día. Y aumentará así la producción diaria de papel de imprenta en más de 5800 kilogramos, lo que reducirá en esa cantidad el consumo de trapería, y disminuirá así el precio de ambos. El tratamiento actual de pulperización de la madera fue iniciado en torno a 1850 por el señor Hugh Burgess.»

El «proceso a la sosa», coinvención de Burgess, se mostró muy eficiente en la extracción de celulosa de la madera.

Vagos de alta tecnología

«En el Támesis, se ha abandonado la campana de inmersión en favor del traje de buzo, porque, durante la construcción del puente de Westminster, se encontró que los trabajadores pasaban su tiempo en el fondo jugando a las cartas, sin que desde luego hubiera ningún medio eficaz de controlarlos. Pero no es fácil jugar a los naipes a solas y vestido de buzo, y el remedio se ha mostrado muy satisfactorio en su aplicación.»

SCIENTIFIC AMERICAN SUPPLEMENT, VOL. LXXXI, N.º 2101, 8 DE ABRIL DE 1916



EVOLUCIÓN
El enigmático origen de nuestra especie
Kate Wong

Un sorprendente conjunto de fósiles hallado en Sudáfrica, atribuido a una nueva especie humana, está generando una agitada polémica acerca de nuestros orígenes.



SOSTENIBILIDAD
Los refugiados sirios, víctimas del cambio climático
John Wendle

Los granjeros que han huido del país en guerra explican cómo la sequía y los abusos del Gobierno impulsaron la violencia social.

NEUROCIENCIA
Eliminación de residuos del cerebro
Maiken Nedergaard y Steven A. Goldman

Un sistema interno depura las sustancias tóxicas que se acumulan en el cerebro. Conocerlo en profundidad ayudaría a tratar enfermedades como el alzhéimer o el párkinson.



COSMOLOGÍA
El misterio de la energía oscura
Adam G. Riess y Mario Livio

¿Por qué se acelera la expansión del universo? Tras dos décadas de estudio, la respuesta sigue siendo igual de enigmática, pero las preguntas están cada vez más claras.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Robin Lloyd
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Voss

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes y El juego de las bacterias*; Javier Grande: *En busca del Planeta X, La energía nuclear después de Chernóbil y ¿Profetas de un apocalipsis digital?*; Fabio Teixidó: *Seis mil millones de africanos y Fuentes naturales de hidrógeno*; Sara Arganda: *El poder del cerebro infantil*; Mercè Piqueras: *Un siglo de bacteriófagos*; Laia Mestre: *La sabiduría colectiva de las hormigas*; Guzmán Sánchez: *Los centinelas del sabor amargo*; Marián Beltrán: *¿Democracia digital o control del comportamiento? y Una estrategia para la era digital*; J. Vilardell: *Aerogeneradores verticales y Hace...*; Bartolo Luque: *El legado matemático de Lewis Carroll*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3
08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España